Thai Journal of Physics Vol. 34 No. 34 (2017) 30-36

นวัตกรรมไมโครเวฟในการผลิตผงนัว และข้าวพอง

หมุดตอเล็บ หนิสอ

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

นวัตกรรมไมโครเวฟในการผลิตผงนัว และ ข้าวพอง มีที่มาจากการร่วมพูดคุยอภิปรายร่วมกับ กลุ่มเกษตรกรตำบลปากพูน และ ผู้ผลิตข้าวพองที่ตำบลปากนคร จังหวัดนครศรีธรรมราช ในเรื่องความต้องการการใช้ตู้อบ เสริมหรือทดแทนการตากแดด ทางผู้วิจัย จึงได้ทำการออกแบบตู้อบผงผัก และตู้อบข้าวพองด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้เหมาะสมและสะดวกในการใช้งานของกลุ่มชุมชน

บทนำ

ในการพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟเพื่อการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ ปาล์ม และสมุนไพร เป็นต้น คลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุดังกล่าว โดยการดูดกลืนคลื่นของน้ำและโมเลกุลที่มีขั้ว [1] เนื่องจากความถี่ของการหมุนของโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นขั้วสูงกับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เกิดการกำทอน (Resonance) ทำให้น้ำสามารถดูดพลังงานของคลื่นไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [2] โดยพลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อวัสดุอื่นๆน้อยมาก น้ำจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งโมเลกุลน้ำจะแพร่มายังด้านนอกของวัสดุหรือถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนประกอบอื่นๆของวัสดุขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ [3] ถ้าใช้กำลังต่ำๆจะทำให้เกิดการอบแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของวัสดุได้ดี เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะใช้ในการระเหยของความชื้นออกจากวัสดุ โดยที่ความร้อนดังกล่าวจะไม่ทำให้โครงสร้าง สี กลิ่นและคุณค่าทางโภชนาการเกิดการเสียหาย

ที่มาและความสำคัญของโจทย์วิจัย

ผงนัวหรือผงผักปรุงรส เป็นผลิตภัณฑ์จากพืชผักซึ่งเป็นสมุนไพรพื้นบ้าน เช่น ผักหวาน ผักโขม ผักตำลึง ข้าวโพดอ่อน ใยข้าวโพด ผักเขลียง เป็นต้น มีการผลิตผงนัวทั้งในภาคอีสานและภาคใต้เพื่อใช้แทนผงชูรส การใช้ผงนัวจะส่งผลดีต่อสุขภาพ สามารถลดปัญหาการเป็นโรคความดันโลหิตสูงในผู้สูงอายุ ลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือน ในปี 2553 กลุ่มเกษตรกรตำบลปากพูน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ในรูปที่ 1 มีการรวมกลุ่มกันเพื่อผลิตผงนัวจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นทั้งหมด ซึ่งสามารถสร้างรายได้เป็นอาชีพเสริมให้กับชุมชน โดยมีตลาดทั้งในท้องถิ่น และในต่างจังหวัด และได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งคาดว่าจะมีการขยายตัวของตลาดเพิ่มเติมในอนาคต แต่ปัญหาและข้อจำกัดที่สำคัญในการผลิตผงนัวในเชิงพาณิชย์ คือจะต้องตากแดดพืชผักซึ่งเป็นวัตถุดิบให้แห้งจนกรอบ โดยจะใช้เวลาประมาณ 2 - 3 วัน และในช่วงที่มีฝนตกจะไม่สามารถผลิตผงนัวได้ นอกจากนั้น การตากแดดที่นานเกินไปจะลดคุณค่าทางยาและคุณค่าทางโภชนาการของผงนัว ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟจะช่วยทำให้สามารถผลิตผงนัวได้อย่างมีคุณภาพ และสามารถควบคุมปริมาณการผลิตได้ ซึ่งจากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าสามารถทำแห้งพืชผักต่างๆ ด้วยคลื่นไมโครเวฟภายในเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและกลิ่นน้อยมาก

รูปที่ 1 กลุ่มชุมชนคนรักสุขภาพตำบลปากพูน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่รวมกลุ่มกันเพื่อผลิตผงนัวจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ข้าวพองเป็นอาหารคบเคี้ยวซึ่งเป็นที่นิยมโดยทั่วไป มีความต้องการของตลาดสูง ซึ่งมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นอาชีพของชุมชนในจังหวัดนครศรีธรรมราช จึงต้องการที่จะพัฒนาให้สามารถผลิตข้าวพองได้อย่างมีคุณภาพมากขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นจึงได้ร่วมมือกับแม่บุญจิตรในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นผู้ผลิตข้าวพองที่ตำบลปากนคร ที่ได้รับการคัดเลือกให้เป็นสินค้าโอทอปของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อพัฒนาต้นแบบการผลิตข้าวพองที่มีคุณภาพ และสามารถควบคุมปริมาณการผลิตได้ตามความต้องการของตลาด ซึ่งกระบวนการผลิตข้างพองน้ำแตงโมแม่บุญจิตร ปัจจุบันจะใช้กระบวนการตากแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ ซึ่งจะประสบปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอของแสงแดด เนื่องจากข้างพองจะต้องทำการตากให้แห้งภายในครั้งเดียว เพราะหากกระบวนกรทำแห้งไม่ต่อเนื่องจะทำให้เวลาทอดข้าวจะไม่พอง กรอบ และเสียคุณภาพได้ และในฤดูฝนก็จะประสบปัญหาสินค้าขาดตลาดเนื่องจากไม่สามารถผลิตข้าวพองส่งให้ลูกค้าได้ ซึ่งจากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าสามารถทำแห้งข้าวพอง ด้วยคลื่นไมโครเวฟภายในเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้ข้าวแห้งได้ โดยเมื่อนำไปทอดแล้วข้าวจะพองตัวได้ขนาดตามที่ต้องการ

รูปที่ 2 *กระบวนการผลิตข้างพองน้ำแตงโมแม่บุญจิตรที่ใช้กระบวนการตากแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว*

การดำเนินงาน

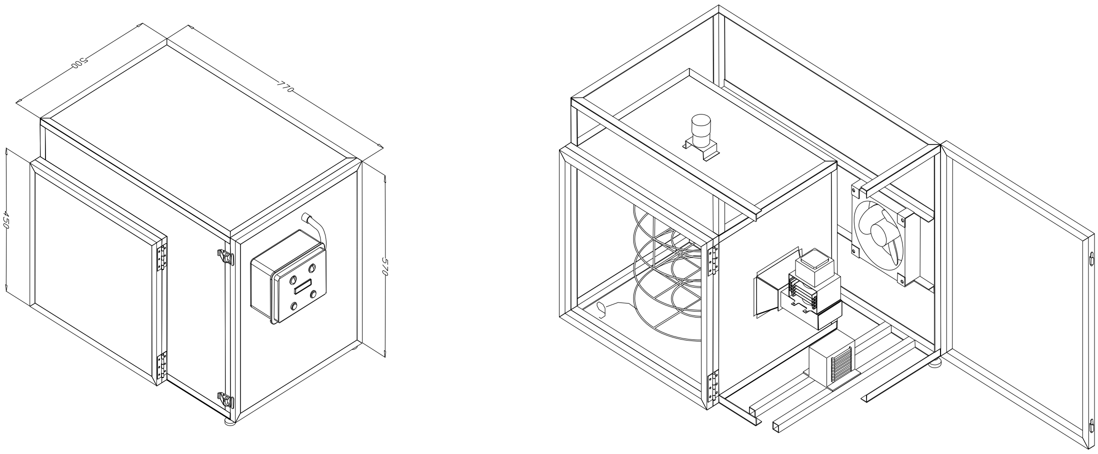
1. การอภิปรายร่วมกับชุมชนในการร่วมกันปรับปรุงวิธีการผลิต

จากการพูดคุยอภิปรายร่วมกับชุมชนคนรักสุขภาพในรูปที่ 4 พบว่าปัจจุบันประสบปัญหาการผลิตผงนัว เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแสงอาทิตย์ ซึ่งการตากแห้งผักนั้นต้องใช้เวลาถึง 2-3 วัน หากฝนตกจะทำให้กระบวนผลิตไม่ต่อเนื่อง ผักอาจจะเสียคุณภาพได้ จากการสอบถามปริมาณการผลิตของทางกลุ่ม และความสะดวกในการใช้งานของทางกลุ่มชุมชนคนรักสุขภาพแล้ว ทางห้องปฏิบัติการพลาสมาประยุกต์เพื่อการกสิกรรม มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์จึงได้ทำการออกแบบตู้อบผงผักด้วยไมโครเวฟเพื่อให้เหมาะสมและสะดวกในการใช้งานของกลุ่ม

สินค้าข้าวพองแม่บุญจิตรก็ประสบปัญหาการทำแห้งข้าวพองเช่นเดียวกับกลุ่มชุมชนคนรักสุขภาพเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแสงอาทิตย์ ทำให้ผลิตสินค้าไม่ทันกับความต้องการของตลาด

รูปที่ 3 *การร่วมพูดคุยอภิปรายร่วมกับชุมชนคนรักสุขภาพและข้าวพองแม่บุญจิตร*

2. การออกแบบและสร้างตู้อบผักด้วยไมโครเวฟ

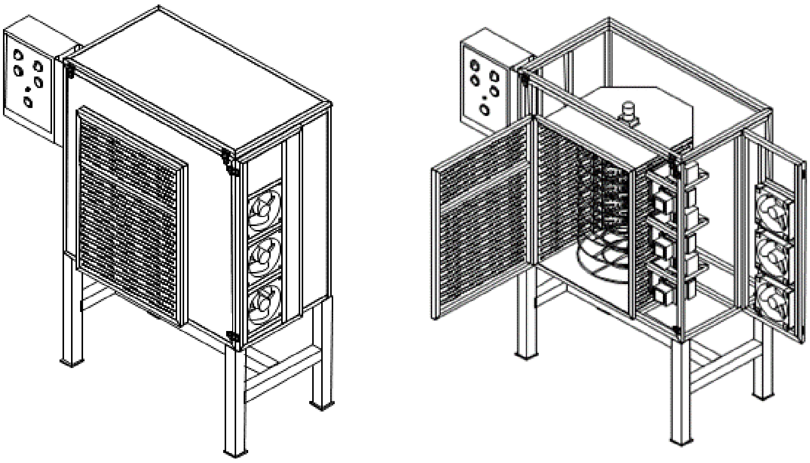


รูปที่ 4 *แบบตู้อบไมโครเวฟสำหรับผลิตผงนัว*

ทางห้องปฏิบัติการได้ออกแบบตู้อบผักให้อบผักได้ครั้งละ 500 กรัม ห้องอบมีขนาด 45×45×50 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีถาดสำหรับใส่ผัก 4 ชั้น มีหัวแมกนีตรอน 1 หัว และมีพัดลมในการระบายความชื้นที่ออกมาจากกระบวนการอบแห้ง ใช้เวลาในการอบครั้งละ 1 ชั่วโมงครึ่ง ถึง 2 ชั่วโมง โดยมีแบบและตู้ที่สร้างเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ โดยสามารถอบแห้งผักตำลึงให้แห้งจนกรอบและรักษาสีเขียวได้

รูปที่ 5 ตู้อบไมโครเวฟสำหรับผลิตผงนัวและการส่งมอบเครื่องให้กับชุมชน

3. การออกแบบและสร้างตู้อบข้าวพองด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 6 แบบตู้อบไมโครเวฟสำหรับอบข้าวพอง

ทางห้องปฏิบัติการได้ออกแบบตู้อบผักให้อบข้าวพองได้ครั้งละ 5 กิโลกรัม ห้องอบมีขนาด 50×50×75 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีถาดสำหรับใส่ข้าวพอง 10 ชั้น มีหัวแมกนีตรอน 3 หัว และมีพัดลมในการระบายความชื้นที่ออกมาจากกระบวนการอบแห้ง ใช้เวลาในการอบครั้งละ1 ชั่วโมงครึ่ง ถึง 2 ชั่วโมง โดยแบบและตู้ที่สร้างเสร็จแล้วมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

รูปที่ 7 *ตู้อบไมโครเวฟสำหรับผลิตข้าวพอง*

4. ผลิตภัณฑ์และศูนย์การเรียนรู้

รูปที่ 8 *ผงนัวที่ชุมชนคนรักสุขภาพ ตำบลปากพูน ผลิตเพื่อจำหน่าย*

รูปที่ 8 แสดงลักษณะของผงนัวและบรรจุภัณฑ์ที่ชุมชนผลิตเพื่อจำหน่าย ซึ่งมีความต้องการทั้งตลาดภายในท้องถิ่น และตลาดในกรุงเทพฯ โดยได้มีโอกาสร่วมประชาสัมพันธ์กับมหาวิทยาลัยลักษณ์ในงาน Thailand Research Expo 2011 ที่เซ็นทรัลเวิลด์

***รูปที่ 9** ข้าวพองซึ่งอบแห้งด้วยตู้ไมโครเวฟ*

ข้าวพองซึ่งผลิตด้วยตู้อบไมโครเวฟมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 9 โดยตู้อบแห้งไมโครเวฟสามารถทำแห้งข้าวพองได้ครั้งละ 2.5 กก. สามารถผลิตได้วันละ 5 กก.ในวันที่ไม่มีแดด และหากใช้วิธีการตากแดดร่วมด้วยจะสามารถทำแห้งข้าวพองได้ถึงวันละ 10 กก. ต้นทุนในการผลิตข้าวพองถุงละ 14 บาท โดยต้นทุนค่าไฟฟ้า 50 สตางค์ต่อถุง ซึ่งปกติจะผลิตข้าวพองวันละ 5 กก. ได้ผลผลิตวันละ 50 ถุง จำหน่ายถุงละ 20 บาท สามารถสร้างรายได้ได้วันละ 300 บาท หรือเดือนละประมาณ 6000 บาท(ผลิตเดือนละประมาณ 1000 ถุง) ตารางที่ 1 แสดงต้นทุนและและกำไรในการผลิตข้าวพองในช่วงเดือน พฤษภาคม – กรกฎาคม 2554

ตารางที่ 1 ต้นทุนและกำไรในการผลิตข้าวพองในช่วงเดือนพฤษภาคม – กรกฎาคม 2554

เดือน	จำนวนวันผลิต (วัน)	ปริมาณข้าว (กก.)	ไฟฟ้า (ยูนิต)	ไฟฟ้า (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)	ผลผลิต (ถุง)	ราคาจำหน่าย (บาท)	กำไร (บาท)
พฤษภาคม	12	67	94	282	9,259	670	13,400	4,141
มิถุนายน	11	80	50	150	10,225	800	16,000	5,775
กรกฎาคม	9	65	48	144	8,920	650	13,000	4,080

การดำเนินการพัฒนาศูนย์การเรียนรู้การผลิตข้าวพองเพื่อการจำหน่ายในเชิงพานิชย์ สามารถเป็นต้นแบบในการประกอบธุรกิจขนาดย่อยที่ใช้การผสมผสานระหว่างภูมิปัญญาของชุมชนกับเทคโนโลยีไมโครเวฟ โดยในช่วงเดือนมีนาคม – กรกฎาคม พ.ศ. 2554 มีกลุ่มศึกษาดูงาน 10 กลุ่มเข้าเยี่ยมชม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กลุ่มศึกษาดูงานการผลิตข้าวพองด้วยเทคโนโลยีไมโครเวฟ

วัน เดือน ปี	รายชื่อกลุ่มศึกษาดูงาน
14-18 มีนาคม พ.ศ. 2554	เทศบาลตำบลครึ่ง อ.เชียงของ จ.เชียงราย
4-8 เมษายน พ.ศ. 2554	อบต.เสนางคนิคม อ.เสนางคนิคม จ.อำนาจเจริญ
25-29 เมษายน พ.ศ. 2554	เทศบาลตำบลวังขนาย อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี
9-13 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	อบต.หน่อม อ.อาจสามารถ จ.ร้อยเอ็ด
23-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	เทศบาลตำบลหันคา อ.หันคา จ.ชัยนาถ
3 มิถุนายน พ.ศ. 2554	อบต.พระแก้ว อ.ภาชี จ.พระนครศรีอยุธยา
13-17 มิถุนายน พ.ศ. 2554	อบต.วัดพริก อ.เมือง จ.พิษณุโลก
20-24 มิถุนายน พ.ศ. 2554	อบต.บ้านแลง อ.เมือง จ.ลำปาง
4-8 กรกฎาคม พ.ศ. 2554	อบต.หนองปลาไหล อ.บางละมุง จ.ชลบุรี
18-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2554	อบต.ปทุมวาปี อ.ส่องดาว จ.สกลนคร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและพัฒนานวัตกรรมไมโครเวฟนี้ ได้รับทุนวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ขอขอบคุณ ชุมชนคนรักสุขภาพ ตำบลปากพูน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช และ คุณบุญจิตร กาละวิก ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และร่วมทดสอบผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, “วิศวกรรมไมโครเวฟ”, 2nd ed., กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

[2] D. Pozar, “Microwave Engineering”, 3rd ed., John Wiley and Sons, 2004

[3] M. Gupta and E. Wong Wai Leong, “Microwaves and Metals”, John Wiley & Sons, 2007

อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์กับการต้านเชื้อจุลชีพก่อโรค

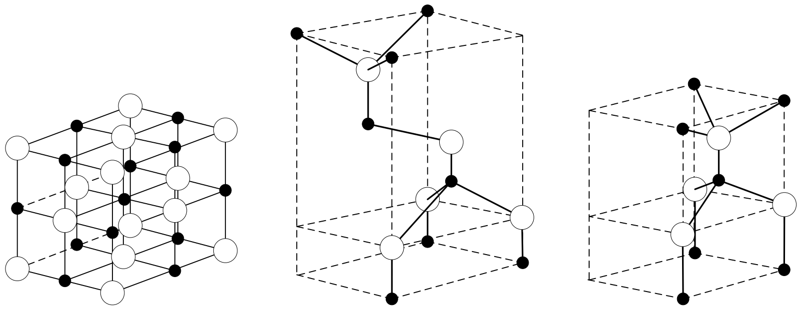
ฉัตร ผลนาค

สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

บทคัดย่อ

การต้านเชื้อจุลชีพของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO NPs) ได้รับความสนใจและศึกษาอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เทคโนโลยีนาโนเพื่อการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตร จุลินทรีย์หลายชนิดมีขนาดอยู่ในช่วงตั้งแต่หลายร้อยนาโนเมตรจนถึงหลายสิบไมโครเมตร ZnO NPs ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราบางชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นผิวที่จำเพาะจงจากการลดขนาดของอนุภาคลงนำไปสู่การเพิ่มปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาค ZnO เป็นวัสดุที่ปลอดภัยทางชีวภาพ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) ซึ่งมีผลต่อกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพของสายพันธุ์สิ่งมีชีวิต บทความนี้นำเสนอการศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวอนุภาค ZnO จากการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นและคุณสมบัติทางแสงของทีมนักวิจัยต่างๆ จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และการนำไปใช้ประโยชน์ในการยับยั้งเชื้อจุลชีพที่ความเข้มข้นต่ำสุด รวมทั้งการอธิบายกลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราก่อโรคบางชนิด โดยมุ่งเน้นอธิบายกลไกลการเกิดปฏิกิริยา Reactive Oxygen Species (ROS) ในเชื้อจุลชีพ ROS เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของผนังเซลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจาก ZnO NPs ซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลได้มากขึ้นและการดูดซึมซิงก์ไอออนที่เป็นพิษ ส่งผลให้ไมโตคอนเดรียอ่อนแอ รวมทั้งเกิดการรั่วไหลและความเครียดของยีนภายในเซล จนทำให้เกิดการยับยั้งการเติบโตของเซลและเกิดการตายของเซลในที่สุด

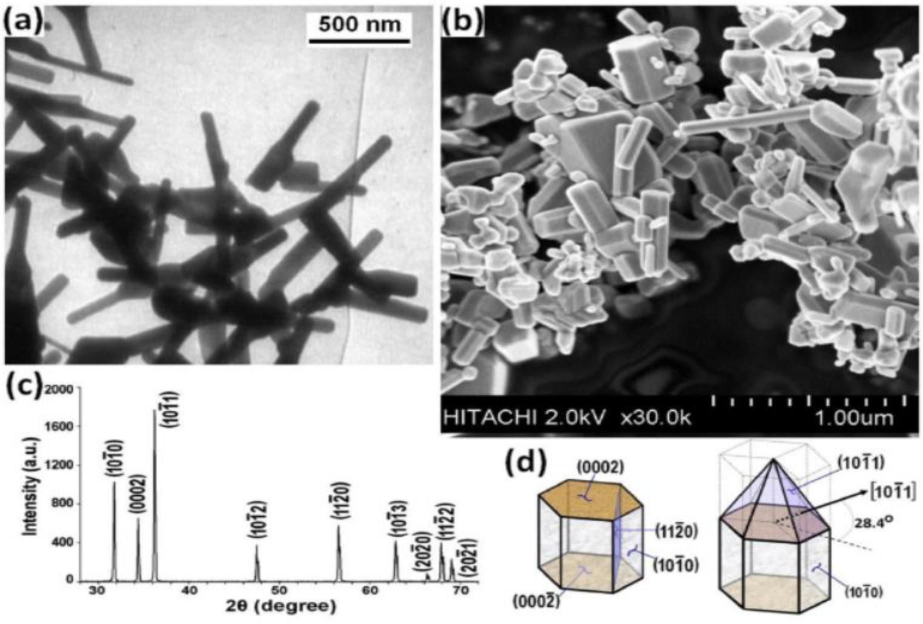
ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านโลหะนาโน (เช่น Au, Ag, Pt) และโลหะออกไซด์นาโน (เช่น TiO_2, MgO, CuO, ZnO) ได้ถูกนำไปใช้ในงานภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์อุปโภคและบริโภค อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้อนุภาคนาโน อาทิเช่น กลุ่มสิ่งทอ ใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในการกำจัดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ในเสื้อผ้า จากการศึกษาพบว่าการผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในเนื้อผ้า เมื่อมีการใช้งานและผ่านการซักไประยะหนึ่ง อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์พวก *E. coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในการผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในเนื้อผ้ามักใช้อัตราส่วนของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 1 ส่วนต่อเส้นใยผ้า 1 ล้านส่วน ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่เล็กน้อยมาก แต่เพียงแค่นี้ก็มากพอที่จะหยุดยั้งการเจริญของเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยังช่วยระงับกลิ่นเหงื่ออีกด้วย สำหรับการใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่นในกระบวนการการผลิตตู้เย็น พบว่าสามารถช่วยรักษาความเย็น และช่วยยืดอายุของอาหารที่เก็บในตู้เย็น นอกจากนี้ยังมีการใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในการผลิตเครื่องซักผ้า เนื่องจากพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถกำจัดเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี ในทำนองเดียวกัน อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีคุณสมบัติต้านทานเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราเช่นเดียวกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แต่ต้นทุนถูกกว่าและยังแสดงสมบัติที่โดดเด่นอื่น ๆ หลายประการทั้งทางด้านไฟฟ้า แสง เคมี และชีวภาพ อาทิเช่น กำเนิดประจุไฟฟ้า เร่งปฏิกิริยา ดูดกลืนแสงยูวี และยับยั้งจุลชีพก่อโรค ฯลฯ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีสัณฐานที่หลากหลาย สามารถเตรียมได้ง่ายและหลากหลายวิธีการ อีกทั้งยังให้ผลผลิตสูงและต้นทุนการผลิตต่ำ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์โดยส่วนใหญ่ได้รับการนำไปใช้ในเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ซีเมนต์ เครื่องแก้ว เซรามิกส์ สี ปุ๋ยเคมี เครื่องสำอางป้องกันแสงแดด ยาลดผดผื่นคัน และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ทั่วไปในครัวเรือน อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีแนวโน้มที่จะใช้ประโยชน์มากขึ้นในอนาคต



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์แบบต่าง ๆ ได้แก่ ผลึกเกลือหินคิวบิก (cubic rocksalt) ผลึกซิงก์เบล็นด์คิวบิก (cubic zincblende) และเฮกซาโกนอลเวิร์ทไซท์ (hexagonal wurtzite) เรียงจากซ้ายไปขวา ทรงกลมสีขาวและสีดำแสดงอะตอมของ Zn และ O ตามลำดับ (ดัดแปลงมาจาก Morkoç & Özgür (2009, p. 2))

ในทางทฤษฎี สังกะสีออกไซด์หรือซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุหมู่ II-VI ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไออนิก (Kittel, 2005, p. 69) เป็นของกลุ่มสเปส C_{6v}^{4} หรือ $P6_3mc$ (Morkoç & Özgür, 2009, p. 2) และมีเฟสโครงสร้างแบบเวิร์ตไซท์ (wurtzite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เสถียรภายใต้เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมปกติ แต่เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะความดันสูงและอุณหภูมิสูง ZnO จะเปลี่ยนเฟสโครงสร้างไปเป็นแบบซิงก์เบลนด์ (zincblende) และเกลือหิน (rocksalt หรือ Rochelle salt) ในหนึ่งยูนิตเซลของ ZnO แต่ละอะตอมของ Zn ถูกแวดล้อมโดยอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม อยู่ที่มุมของแลตทิซโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอล และเซลถัดไปชนิดของอะตอมจะสลับตำแหน่งในตรงกันข้ามกัน โครงสร้างผลึกและการจัดวางอะตอมของ ZnO ทั้งสามเฟส แสดงดังภาพที่ 1 โดย ZnO มีขนาดของช่องว่างพลังงานกว้าง (wide band gap) เท่ากับ 3.37 eV และมีพลังงานยึดเหนี่ยวคู่อิเล็กตรอนโฮล (exciton binding energy) ประมาณ 60 meV (Coleman and Jagadish, 2006) การที่มีสมบัติแถบพลังงานงานกว้างทำให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางแสง ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย โดยสารกึ่งตัวนำนี้สามารถใช้ทดแทนสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่มีราคาแพง เช่น ซิลิกอน (Si) แกลเลียมไนไตรต์ (GaN) หรือมีองค์ประกอบของโลหะหนักที่เป็นพิษ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) และ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ตลอดระยะเวลากว่าสิบปีที่ผ่านมา ซิงก์ออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายสาขา อาทิ การแพทย์ เภสัชกรรม ทันตกรรม เกษตรกรรม อุตสาหกรรม ยืนยันได้จากปริมาณการใช้ซิงก์ออกไซด์ทั่วโลกสูง หลายล้านตันต่อปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา (Zinc Oxide, Retrieved December 21, 2009, from http://toxnet.nlm.nih.gov) โดยส่วนใหญ่ใช้ในการผลิต อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยางรถยนต์ ซีเมนต์ เครื่องแก้ว เซรามิกส์ สี ปุ๋ยเคมี เครื่องสำอาง ยาสามัญประจำบ้าน และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ทั่วไปในครัวเรือน จนถึงในระดับอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ อีกทั้งมีแนวโน้มที่จะใช้ประโยชน์มากขึ้นในอนาคต ทำให้นักฟิสิกส์ เคมี วัสดุศาสตร์ และวิศวกร ต่างพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคที่หลากหลาย อาทิเช่น chemical vapor transport, condensation chemical vapor deposition hydrothermal, thermal evaporation, sol-gel, microwave assisted, template-based growth, pulsed laser deposition, ion beam implantation, molecular beam epitaxy, และ plasma sputtering (Shi, Cao, Zhao, Song, and Rong, 2008) เป็นต้น โดยสามารถลดขนาดของโครงสร้างซิงก์ออกไซด์ให้เล็กลงจนมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้มีความบริสุทธิ์สูงและมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น อีกทั้งเทคนิคเหล่านี้ยังสามารถควบคุมให้ซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้าง และคุณลักษณะเฉพาะที่โดดเด่นแตกต่างกันออกไปตามต้องการ เพื่อประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกันทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น organic LED, short-wavelength LED,

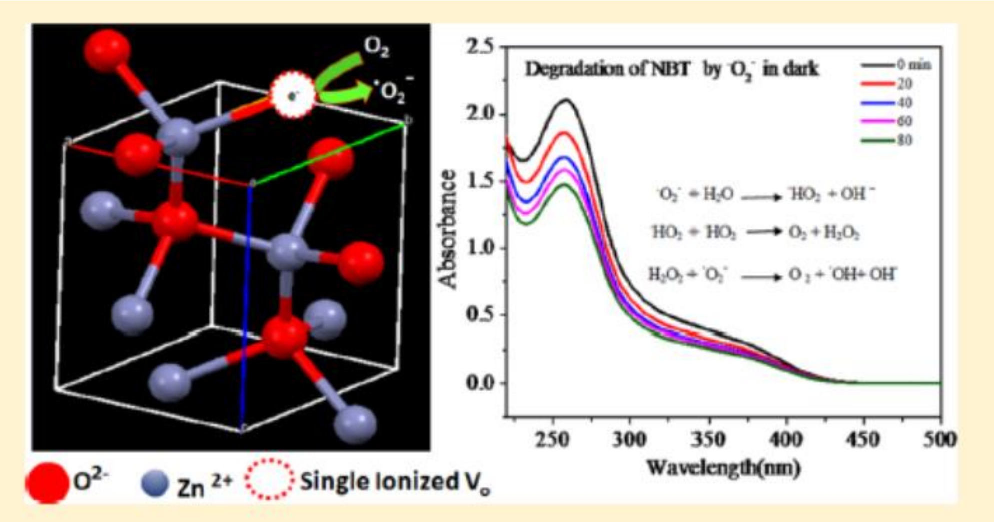
ethanol gas sensor, dye-sensitized solar cell, UV laser, transparent conductor, และ piezoelectric material (Gustafsson, Cao, Treacy, Klavetter, Colaneri, and Heeger, 1992; Gupta and Compaan, 2006; Hou, Xiong, Xie, Li, Zhang, and Tian, 2004)



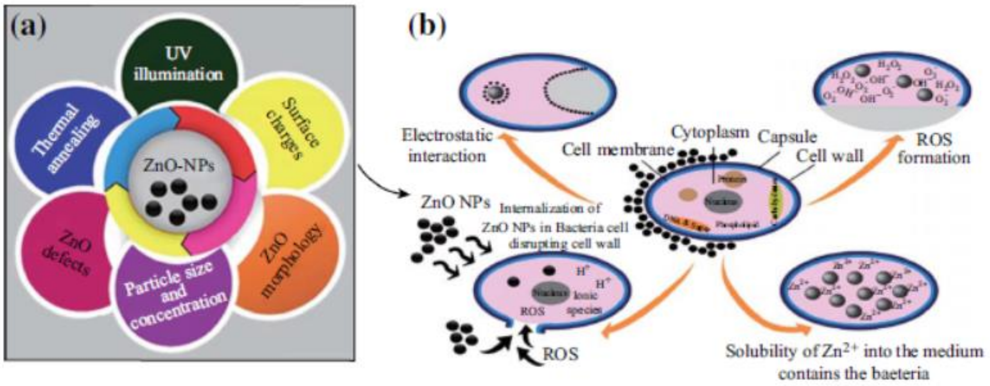
รูปที่ 2 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และรูปร่างผลึกของซิงก์ออกไซด์ ตามลำดับ (ที่มา : Nafchi, Nassiri, Sheibani, Ariffin, Karim, 2013)

สำหรับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO nanoparticles) ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการมีเอกลักษณ์โดดเด่นจากสมบัติและกลไกการทำงานหลากหลาย (multifunctional properties) มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง เช่น ทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ยางแข็งขึ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี (vulcanization activator) ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และเป็นตัวดูดกลืนแสงย่านอัลตราไวโอเลต (ultraviolet absorption) และแสงย่านที่ตามองเห็นได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซิงก์ออกไซด์เกรดพาณิชย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโคร ซึ่งปกติจะมีสัณฐานผลึกเป็นแบบแท่งหกเหลี่ยม (hexagonal nanorod) ดังรูปที่ 2 ส่วนใหญ่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสี ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ แก้วและเซรามิกส์ รวมถึงเป็นส่วนผสมในเวชภัณฑ์ยาและเครื่องสำอางป้องกันแสงแดดอีกด้วย สมบัติและกลไกการทำงานที่น่าสนใจเหล่านี้ส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องจากการมีโครงสร้างผลึกเชิงเดียวแบบหนึ่งมิติ ที่มีความบริสุทธิ์สูงและด้วยสัณฐานที่จำเพาะมีเอกลักษณ์ และมีความหลากหลายของรูปร่างลักษณะผลึก เช่น nanowire nanobelt nanorods nanotube และ nanowhisker (Yang et al., 2002; Wang, 2004; Jung et al., 2008; Zhao, Cao, Yuan, Lu, Wang, and Zhang, 2010) ฯลฯ จึงทำให้ซิงก์ออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ และเนื่องจากความเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ที่สามารถใช้เป็นส่วนประกอบพื้นฐานในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และโฟโตนิกส์ ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเทียบเคียงกันเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูงกว่าและกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อน ตัวอย่างอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจากซิงก์ออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนได้แก่ laser (Huang et al., 2001) LED (Chichibu, Ohmori, Shibata, Koyama, and Onuma, 2005) MOSFET

(LaRoche et al., 2005) varistor (Lee and Kang, 2006) gas sensor (Carotta et al., 2009) solar cells (Keis et al., 2002) และ piezoelectric nanogenerator (Wang and Song, 2006) เป็นต้น เมื่อไม่นานมานี้อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยทางด้านชีววิทยา การเกษตร อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ เนื่องจากซิงก์ออกไซด์มีกลไกลการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคบางชนิดอย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น เชื้อรา (Snoop, Mahesh, Nampoothiri, Mangalaraja, and Ananthakumar, 2012; Sharma, Rajput, Kaith, Kaur, and Sharma, 2010; Prasad, Shaikh, Kathe, Bisoyi, and Verma, 2010) เชื้อแบคทีเรีย (Wahab et al., 2012) และไบโอฟิล์ม (Eshed, Lellouche, Matalon, Gedanken, and Banin, 2012; Ronen, Semiat, and Dosoretz, 2013) แต่เนื่องจากการรายงานกลไกลการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของซิงก์ออกไซด์มีหลายทฤษฎี (Padmavathy and Vijayaraghavan, 2008; Vidic et al., 2013; Perelshtein et al., 2009; Xu et al., 2013) และยังขึ้นกับขนาดอนุภาค (Yamamoto, 2001) สัณฐานของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ (Phaechamud, Mahadlek, Aroonrerk, Choopan, and Charoenteeraboon, 2012; Talebian, Amininezhad, and Doudi, 2013) รวมทั้งปฏิกิริยากับแสง (Kim and An, 2012) อีกทั้งยังมีเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคอีกหลายชนิดที่พบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมภายในชุมชน ที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์และสัตว์ จากรายงานการวิจัยการนำอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ไปใช้ศึกษาคุณสมบัติกลไกลการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคบางชนิดในชุมชน อาทิเช่น 1) *Escherichia coli* เป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม เป็นตัวชี้การปนเปื้อนของอุจจาระในน้ำ มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ แบคทีเรียชนิดนี้ทำให้เกิดอาการท้องเสียบ่อยที่สุด ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลว หรือเป็นน้ำ แต่อาการมักไม่รุนแรงเพราะทั้งเด็กและผู้ใหญ่มักมีภูมิต้านทานอยู่บ้างแล้ว เนื่องจากได้รับเชื้อนี้เข้าไปทีละน้อยอยู่เรื่อย ๆ เชื้อนี้มักปนเปื้อนมากับอาหาร น้ำ หรือมือของผู้ประกอบอาหาร 2) *Salmonella typhimurium* เป็นเชื้อก่อโรคในระบบทางเดินอาหารที่สำคัญและพบได้มาก เนื่องจากเป็นเชื้อที่ปนเปื้อนในตัวอย่างอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่ได้มาจากเนื้อสัตว์ เช่น เนื้อหมู เนื้อไก่ รวมทั้งผักสด นอกจากนี้เชื้อยังมีปัญหาการดื้อยาต้านจุลชีพที่ค่อนข้างสูงและเป็นปัญหาสำคัญในการรักษา 3) *Pseudomonas aeruginosa* เป็นเชื้อก่อโรคฉวยโอกาส และมีปัญหาโดยเฉพาะกรณีเป็นเชื้อที่ติดต่อในโรงพยาบาล และกรณีของผู้ป่วยแผลไฟไหม้จะมีปัญหามากเพราะเชื้อดื้อยามากและมียาต้านจุลชีพที่จำกัดมากในการรักษา 4) *Staphylococcus aureus* เป็นเชื้อปกติพบที่ผิวหนังและเป็นสาเหตุสำคัญของการติดเชื้อที่ผิวหนัง เช่น ฝีหนอง รวมทั้งระบบทางเดินหายใจด้วย บางสายพันธุ์สร้างสารพิษ และทำให้เกิดภาวะอาหารเป็นพิษเฉียบพลัน 5) *Enterococcus faecalis* พบได้ในทางเดินอาหาร มีปัญหาสำหรับบางสายพันธุ์ที่ดื้อยา โดยเฉพาะยา vancomycin เรียกเชื้อพวกนี้ว่า VRE ก่อให้เกิดภาวะกล้ามเนื้อหัวใจอักเสบและอันตรายเนื่องจากมียาที่สามารถใช้รักษาได้ค่อนข้างจำกัด ผู้ติดเชื้อ VRE จะมีอัตราการเสียชีวิตที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อที่ไม่ดื้อยา และจากรายงานวิจัยพบว่าซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ได้ดี ทั้งในการทดสอบโดยวิธี disc diffusion และการทดสอบหาค่า MIC ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับในรายงานการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีผลต่อแบคทีเรียทั้งสองชนิดมากที่สุด (Yousef and Danial, 2012; Karvani and Chehrazi, 2011) นอกจากนี้ยังมีรายงานที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ว่ามีผลต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย 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 ซึ่งเป็นพิษต่อเซลแบคทีเรีย (รูปที่ 3-4)

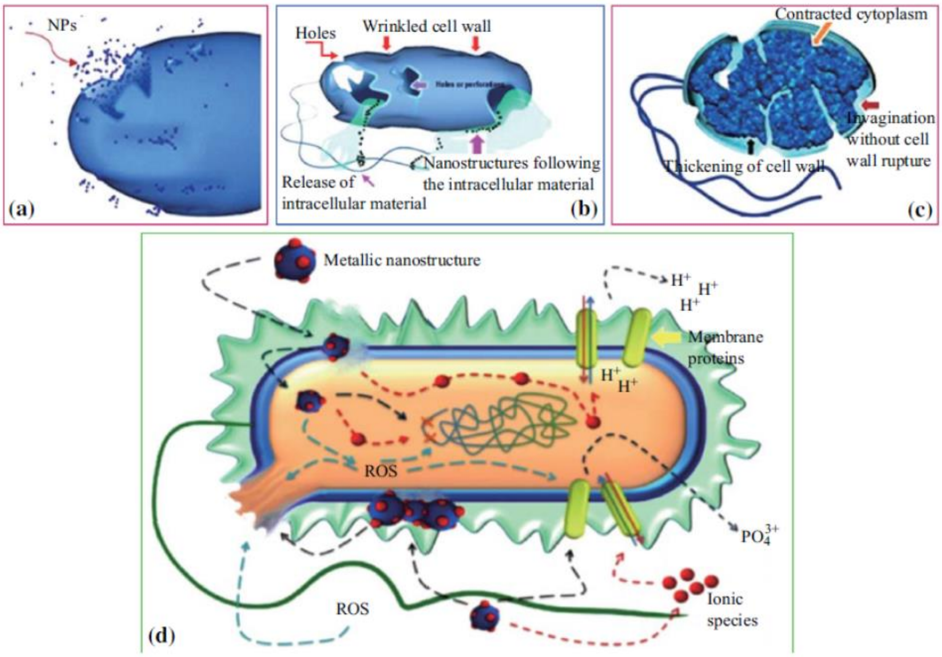


รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการเกิด reactive oxygen species (ROS) ได้แก่ อนุมูลอิสระของ •OH, •O_2^- และ H_2O_2 ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากอนุภาค ZnO ที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ในสภาวะที่มีแสง (light) และปราศจากแสง (dark)(ที่มา : Prasanna and Vijayaraghavan, 2015)



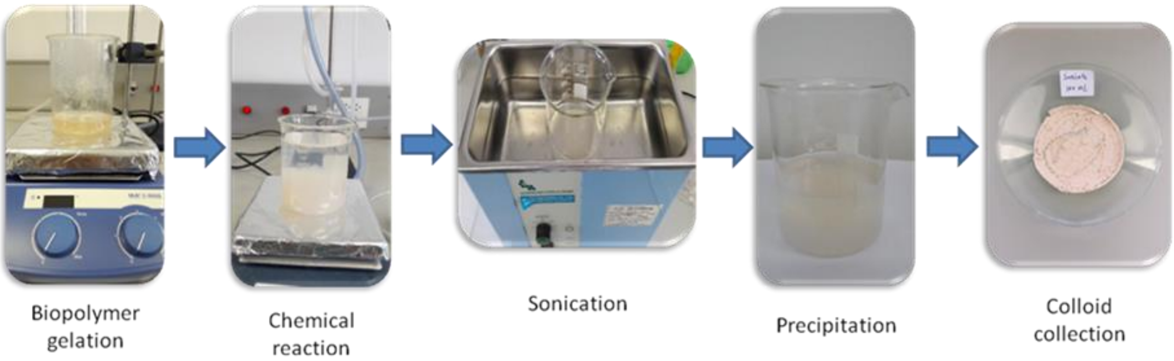
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการต้านเชื้อจุลินทรีย์และกลไกลที่หลากหลายมีความเป็นไปได้ในการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ที่มา : Sirelkhatim, et al., 2015)

นอกจากนี้ยังสันนิษฐานว่าอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กจะเข้าสู่เซลได้ดีกว่า (Raghupathi, Koodali, and Manna, 2011) โดยกลไกลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่คาดว่าน่าจะเกิดจากขนาดของอนุภาคเล็กจนสามารถเข้าสู่ผนังเซล แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพอธิบายกลไกลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่คาดว่าน่าจะเกิดจากขนาดของอนุภาคเล็กมากจนสามารถแทรกซึมเข้าสู่ผนังเซล (ที่มา : Sirelkhatim, et al., 2015)

ปัญหาสภาวะโลกร้อนทำให้นักวิจัยเริ่มตระหนักถึงความรับผิดชอบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงพัฒนาแนวคิดและระเบียบวิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนด้วยกรรมวิธีสีเขียว (green synthesis) โดยใช้ไบโอพอลิเมอร์เป็นรีดิวซ์ (reducing agent) หรือตัวยึดเกาะ (capping agent) ที่ไม่เป็นพิษเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้จากการสกัดจากพืชในธรรมชาติและเส้นใยผัก อาทิเช่น ใบเจอเรเนียม ใบยี่โถ ว่านหางจระเข้ ใบหอมแขก เส้นใยมะรุมและเส้นใยบวบ (Schmid and Corain, 2003; Chandran, Chaudhary, Pasricha, Ahmad, and Sastry, 2006; Franco-Romano, Gil, Palacios-Santader, Delgado-Jaén, Naranjo-Rodríguez, Hidalgo-Hidalgo de Cisneros, and Cubillana-Aguilera, 2014; Jaybhaye, 2015) และพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เช่น น้ำตาลกลูโคส แลคโตส ฟรุกโตส แป้ง เจลาติน วุ้น และไคโตซาน (Sanoop, Mahesh, Nampoothiri, Mangalaraja, and Ananthakumar, 2012; Okitsu, Mizukoshi, Yamamoto, Maeda, and Nagata, 2007; Mishra, Yadav, Pandey, 2010) รวมทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ปลอดภัย เช่น 1-propanol, 1,3-popanediol, 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane, polyethylene glycol และแอลกอฮอล์ (Bhatte, Sawant, Pinjari, Pandit, and Bhanage, 2012; Wei, Famouri, Carroll, Lee, and Famouri, 2013) ตัวอย่างกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยกรรมวิธีสีเขียว แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยกรรมวิธีสีเขียว (green synthesis) โดยใช้แป้งสาคูท้องถิ่นเป็นรีดิวซ์ (reducing agent) หรือตัวยึดเกาะ (capping agent)

อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO NPs) ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น โดยเฉพาะการนำไปผสม (composite) กับวัสดุอื่น เพื่อดัดแปลงและพัฒนาคุณสมบัติเฉพาะ เพิ่มคุณภาพและหน้าที่การทำงานของวัสดุนั้น ตัวอย่างเช่น การเจือซิงก์ออกไซด์นาโนวิสเกอร์ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เพื่อเพิ่มสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น (Zhao, Cao, Yuan, Lu, Wang, and Zhang, 2010) และเพิ่มสมบัติการทนแรงอัดของไฟเบอร์กลาสที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์ด้วยการเติมเตตระพอดซิงก์ออกไซด์ (tetrapod ZnO) ลงในเรซิน (resin) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (Cao et al., 2010) เป็นต้น เมื่อไม่นานนี้ซิงก์ออกไซด์ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านชีววิทยา การเกษตร อุตสาหกรรม และการแพทย์ วัตถุประสงค์เพื่อการยับยั้งเชื้อรา *Aspergillus niger Fusarium sp.* (Snoop, Mahesh, Nampoothiri, Mangalaraja, and Ananthakumar, 2012; Sharma, Rajput, Kaith, Kaur, and Sharma, 2010) เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus Escherichia coli* (Applerot, Perkas, Amarian, Girshevitz, and Gedanken, 2009; Suwanboon, Amornpitoksuk, Bangrak, Sukolrat, and Muensit, 2010) *Bacillus subtillis Aerobacter aerogenes* (Jain, Bhargava, and Poddar, 2013) *Salmonella typhimurium Klebsiella pneumonia* (Wahab et al., 2012) *Candida albicans* (Phaechamud, Mahadlek, Aroonrerk, Choopan, and Charoenteeraboon, 2012) และไบโอฟิล์ม *Steptococcus mutans* (Eshed, Lellouche, Matalon, Gedanken, and Banin, 2012) ซึ่งเป็นแบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก สำหรับการอธิบายกลไกการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยส่วนใหญ่สรุปว่าเกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือ reactive-oxygen species (ROS) (Applerot, Perkas, Amarian, Girshevitz, and Gedanken, 2009; Leung et al., 2012) ขึ้นที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ซึ่งมักเกิดขึ้นร่วมกับกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) (AbdElhady, 2012) ก่อให้เกิดไอออนอิสระ OH^-, O_2^-, HO_2^- และ H_2O_2 หลุดจากผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ (รูปที่ 3) ไอออนอิสระเหล่านี้จะแทรกซึมเข้าสู่เยื่อผนังเซลของเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปทำลายเซลภายใน ทำให้เชื้อจุลินทรีย์หยุดการเจริญเติบโตและตายในที่สุด (รูปที่ 5) นอกจากนี้ยังขึ้นกับเงื่อนไขของขนาดอนุภาคและความเข้มข้นสารละลายซิงก์ออกไซด์อีกด้วย (Sharma, Rajput, Kaith, Kaur, and Sharma, 2010) แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4 ดังนั้นงานวิจัยแต่ละแบบจำเป็นต้องเลือกใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีรูปร่างจำเพาะไปประยุกต์ใช้งานเพื่อความเหมาะสม รวมทั้งจะต้องมีสมบัติการดูดกลืนรังสี UV ถึงแสงย่านการมองเห็นที่ดีอีกด้วย (Talebian, Amininezhad, and Doudi, 2013; Kim and An, 2012) หากกลไกการออกฤทธิ์ยับยั้งจุลชีพต้องอาศัยกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแล้ว (photoactivity) สัณฐานของซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จะต้องมี aspect ratio สูง จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะเตรียมอนุภาคระดับนาโนที่มีค่า aspect ratio สูง อีกทั้งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปใช้เป็นสารออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่ง nano-ZnO สามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมกระดาษ โฟม และเส้นใยผ้า (Prasad, Shaikh, Kathe, Bisoyi, Verma, 2010; Sanoop, *et al.*, 2012) ได้อย่างดีเยี่ยมและยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น ดังนั้นการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับซิงก์ออกไซด์ยังสามารถขยายขอบเขตการศึกษาการต้านเชื้อจุลชีพก่อโรคให้กว้างขึ้นอีกและจะ

สามารถอธิบายกลไกการการออกฤทธิ์ของซิงก์ออกไซด์ที่จำเพาะกับเชื้อโรคที่เลือกทดสอบได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวยาต้านเชื้อโรคที่มีความปลอดภัยเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีราคาถูก ลดต้นทุนการผลิต และปลอดภัยกว่าเมื่อเทียบกับสารเคมีสังเคราะห์สำหรับป้องกันเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราที่มีจำหน่ายในท้องตลาดหรือสารสกัดจากสมุนไพรบางชนิดที่มีราคาแพง ลดการนำเข้ายาต้านเชื้อโรคอีกทั้งเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคตอันใกล้

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์กับการต้านเชื้อจุลชีพก่อโรคที่กล่าวไปทั้งหมดนี้ จะนำไปสู่การพัฒนาหรือนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวยาทางเลือกในการต้านเชื้อจุลชีพก่อโรคที่ดื้อยา หรืออาจจะใช้เป็นตัวนำส่งยา (drug delivery) ที่มีความปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีราคาถูก ลดต้นทุนการผลิตและลดการนำเข้ายาต้านเชื้อต่อไปในอนาคต สำหรับองค์ความรู้ที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์นั้น มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนายกระดับกระบวนการผลิตให้ใหญ่ขึ้นโดยการนำเทคนิคการแผ่คลื่นอัลตราซาวด์ใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมการผลิตเคมีภัณฑ์ เพื่อลดราคาต้นทุนการผลิตซิงก์ออกไซด์ให้ต่ำลงและลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] AbdElhady, M.M. (2012). Preparation and characterization of chitosan/zinc oxide nanoparticles for imparting antimicrobial and UV protection to cotton fabric. **Int. J. Carbohydr. Chem**. 2012, 1-6.

[2] Applerot, G., Perkas, N., Amarian, G., Girshevitz, O., & Gedanken, A. (2009). Coating of glass with ZnO via ultrasonic irradiation and a study of its antibacterial properties. **Appl. Surf. Sci.**. 256S, S3-S8.

[3] Bhatte, K.D., Sawant, D.N., Pinjari, D.V., Pandit, A.B., & Bhanage, B.M. (2012). One pot green synthesis of nano sized oxide by sonochemical method. **Mater. Lett.**. 77, 93-95.

[4] Cao, M.S., Song, W.L., Zhou, W., Wang, D.W., Rong, J.L., Yuan, J., & Agathopoulos, S. (2010). Dynamic compressive response and failure behavior of fiber polymer composites embedded with tetra-needle-like ZnO nanowhiskers. **Compos. Struct.**. 92(12), 2984-2991.

[5] Carotta, M. C., Cervi, A., di Natale, V., Gherardi, S., Giberti, A., Guidi, V., Zanotti, L. (2009). ZnO gas sensors: A comparison between nanoparticles and nanotetrapods-based thick films. **Sens. and Actuators B: Chem**. 137(1), 164-169.

[6] Chandran, S.P., Chaudhary, M., Pasricha, R., Ahmad, A., & Sastry, M. (2006). Synthesis of gold nanotriangles and silver nanoparticles using Aloe vera plant extract, **Biotechnol. Progr.** 22, 577–583.

[7] Chichibu, S. F., Ohmori, T., Shibata, N., Koyama, T., & Onuma, T. (2005). Fabrication of p-($CuGaS_2$/n-ZnO: Al heterojunction light-emitting diode grown by metalorganic vapor phase epitaxy and helicon-wave-excited-plasma sputtering methods. **J. Phys. Chem.Solid** 66(11), 1868-1871.

[8] Coleman, V.A., & Jagadish, C. (2006). Basic properties and applications of ZnO. In Jagadish, C. & Pearton, S.J. (Eds.), **Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: Processing, properties, and applications**. (pp. 1-20). London, England: Elsevie

[9] Eshed, M., Lellouche, J., Matalon, S., Gedanken, A., & Banin, E. (2012). Sonochemical coatings of ZnO and CuO nanoparticles inhibit *Streptococcus mutans* biofilm formation on teeth model. **Langmuir**. 28(33), 12288-12295.

[10] Franco-Romano, M., Gil, M.L.A., Palacios-Santader, J.M., Delgado-Jaén, Naranjo-Rodríguez, Hidalgo-Hidalgo de Cisneros, and Cubillana-Aguilera, L.M. (2014). Sonosynthesis of gold nanoparticles from a geranium leaf extract. **Ultrason. Sonochem**. 21, 1570-1577.

[11] Gupta, A. & Compaan, A.D. (2004). All-sputtered 14% CdS/CdTe thin-film solar cell with ZnO: Al transparent conducting oxide. **Appl. Phys. Lett**. 85(4), 684-686.

[12] Gustafsson, G., Cao, Y., Treacy, G.M., Klavetter, F., Colaneri, N., & Heeger, A.J. (1992). Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers. **Nature**. 357, 477-479.

[13] Hou, H., Xiong, Y., Xie, Y., Li, Q., Zhang, J., & Tian, X. (2004). Structure-direct assembly of hexagonal pencil-like ZnO group whiskers. **J. Solid State Chem**. 177(1), 176-180.

[14] Huang, M. H., Mao, S., Feick, H., Yan, H. Q., Wu, Y. Y., Kind, H., Yang, P. D. (2001). Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers. **Science**. 292(5523), 1897-1899.

[15] Jain, A., Bhargava, R., & Poddar, P. (2013). Probing interaction of gram-positive and gram-negative bacterial cells with ZnO nanorods. **Mater. Sci. Eng: C:Mater. Biol. Appl**. 33(3), 1247-1253.

[16] Jaybhaye, S.V. (2015). Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles Synthesized From Waste. **Mater. Today:. Proc**. 2, 4323-4327.

[17] Jung, S. H., Oh, E., Lee, K. H., Yang, Y., Park, C. G., Park, W., & Jeong, S. H. (2008).Sonochemical preparation of shape-selective ZnO nanostructures. **Cryst. Growth Des**. 8(1), 265-269.

[18] Karvani, Z.E. & Chehrazi, P. (2011). Antibacterial activity of ZnO nanoparticle on grampositive and gram-negative bacteria. **Afr. J. Microbiol. Res**. 5(12), 1368-1372.

[19] Keis, K., Bauer, C., Boschloo, G., Hagfeldt, A., Westermark, K., Rensmo, H., & Siegbahn, H. (2002). Nanostructured ZnO electrodes for dye-sensitized solar cell applications. **J. Photochem. Photobiol. A: Chem**. 148(1-3), 57-64.

[20] Kim, S.W. & An, Y.-J. (2012). Effect of ZnO and TiO_2 Nanoparticles Preilluminated with UVA and UVB light on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**. 95(1), 243-253.

[21] LaRoche, J. R., Heo, Y. W., Kang, B. S., Tien, L. C., Kwon, Y., Norton, D. P., Pearton, S. J. (2005). Fabrication approaches to ZnO nanowire devices. **J. Electron. Mater.**34(4), 404-408.

[22] Lee, B. H., & Kang, S. M. (2006). Properties of ZnO varistor blocks under multiple lightning impulse voltages. **Curr. Appl Phys.**. 6(5), 844-851.

[23] Leung, Y.H., Chan, C.M.N., Ng, A.M.C., Chan, H.T., Chiang, M.W.L., Djurisic, A.B., Ng, Y.H., Jim, W.Y., Guo, M.Y., Leung, F.C.C., Chan, W.K., & Au, D.T.W. (2012). Antibacterial activity of ZnO nanoparticles with a modified surface under ambient illumination. **Nanotechnol.**. 23, 475703.

[24] Mishra, P., Yadav, R.S., & Pandey, A.C. (2010). Growth mechanism and photoluminescence property of flower-like ZnO nanostructures synthesized by starch-assisted sonochemical method. **Ultrason. Sonochem.**. 17, 560-565.

[25] Morkoç, H., & Özgür, U. (2009). **Zinc oxide: Fundam. mater. device Technol.**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Nafchi, A. M., Nassiri, R., Sheibani, S., Ariffin, F., & Karim, A. A. (2013). Preparation and characterization of bionanocomposite films filled with nanorod-rich zinc oxide. **Carbohydr. Polym.** 96, 233-239.

[26] Okitsu, K., Mizukoshi, Y., Yamamoto, T., Maeda, Y., & Nagata, Y. (2007). Sonochemical synthesis of gold nanoparticles on chitosan. **Mater. Lett.** 61, 3429-3431.

[27] Padmavathy, N. & Vijayaraghavan, R. (2008). Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles-an antimicrobial study. **Sci. Technol. Adv. Mater**. 9, 035004.

[28] Perelshtein, I., Applerot, G., Perkas, N., Wehrschetz-Sigl, E., Hasmann, A., Guebitz, G.M., & Gedanken, A. (2009). Antibacterial properties of an in situ generated and simultaneously deposited nanocrystalline ZnO on fabrics. **ACS Appl. Mater. Interfaces**. 1(2), 361-366.

[29] Phaechamud, T., Mahadlek, J., Aroonrerk, N., Choopan, S., & Charoenteeraboon, J. (2012). Antimicrobial activities of ZnO-doxycycline hyclate thermosensitive gel. **ScienceAsia**. 38, 64-74.

[30] Prasad, V., Shaikh, A.J., Kathe, A.A., Bisoyi, D.K., & Verma, A.K. (2010). Functional behavior of paper coated with zinc oxide-soluble starch nanocomposites. **J. Mater. Process. Technol**. 210, 1962-1967.

[31] Prasanna, V.L., & Vijayaraghavan, R. (2015). Insight into the mechanism of antibacterial activity of ZnO: surface defects mediated reactive oxygen species even in the dark. **Langmuir**, 31, 9155-9162.

[32] Raghupathi, K.R., Koodali, R.T., & Manna, A.C. (2011). Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. **Langmuir**. 27(7), 4020-4028.

[33] Ronen, A., Semiat, R., & Dosoretz, C.G. (2013). Antibacterial efficiency of composite nano-ZnO in biofilm development in flow-through systems. **Desalin. Water Treat**. 51(4-6), 988-996.

[34] Sanoop, P.K., Mahesh, K.V., Nampoothiri, K.M., Mangalaraja, R.V., & Ananthakumar, S. (2012). Multifunctional ZnO-biopolymer nanocomposite coatings for health-care polymer forms and fabrics. **J. Appl. Polym. Sci**. 126(SI-1), E232-E243.

[35] Schmid, G., & Corain, B. 2(003). Nanoparticulated gold: syntheses, structures, electronics, and reactivities. **Eur. J. Inorg. Chem**. 17, 3081-3098.

[36] Sharma, D., Rajput, J., Kaith, B.S., Kaur, M., & Sharma, S. (2010). Synthesis of ZnO nanoparticles and study of their antibacterial and antifungal properties. **Thin Solid Films**. 591(3), 1224-1229.

[37] Shi, X.L., Cao, M.S., Zhao, Y.N., Song, W.L., & Rong, J.L. (2008). Preparation and properties of ZnO nano-whiskers. **Sci. China Ser. E: Technol. Sci**. 51(9), 1433-1438.

[38] Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M.,Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. **Nano-Micro Letter**. 7(3), 219-242.

[39] Suwanboon, S., Amornpitoksuk, P., Bangrak, P., Sukolrat, A., & Muensit, N. (2010). The dependence of optical properties on the morphology and defects of nanocrystalline ZnO powders and their antibacterial activity. **Journal of Ceramic Processing Research**. 11(5), 547-551.

[40] Talebian, N., Amininezhad, S.M., & Doudi, M. (2013). Controllable synthesis of ZnO nanoparticles and their morphology-dependent antibacterial and optical properties. **J. Photochem. Photobiol., B.** 120, 66-73.

[41] Toxnet. **Zinc Oxide**. United States National Library of Medicine. Retrieved December 21, 2009, from http://toxnet.nlm.nih.gov

[42] Vidic, J., Stankic, S., Haque, F., Ciric, D., Le Goffic, R., Vidy, A., Jupille, J., & Delmas, B. (2013). Selective antibacterial effects of mixed ZnMgO nanoparticles. **J. Nanopart. Res**. 15(5), 1595.

[43] Wahab, R., Mishra, A., Yun, S.-I., Hwang, I.H., Mussarat, J., Al-Khedhairy, A.A., Kim, Y.-S., & Shin, H.-S. (2012). Fabrication, growth mechanism and antibacterial activity of ZnO micro-spheres prepared via solution process. **Biomass Bioenergy**. 39, 227-236.

[44] Wang, Z.L. (2004). Nanostructures of zinc oxide. **Materials today**. 26-32. ISBN: 1369 7021, Elsevier Limited. Retrieved December 15, 2009, from http://sciencedirect.com

[45] Wang, Z.L. & Song, J.H. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. **Science**. 312(5771), 242-246.

[46] Wei, M.-Y., Famouri, L., Carroll, L., Lee, Y., & Famouri, P. (2013). Rapid and efficient sonochemical formation of gold nanoparticles under ambient conditions using functional alkoxysilane. **Ultrason. Sonochem**. 20, 610-617.

[47] Xu, X., Chen, D., Yi, Z., Jiang, M., Wang, L., Zhou, Z., Fan, X., Wang, Y., & Hui, D. (2013). Antimicrobial mechanism based on H_2O_2 generation at oxygen vacancies in ZnO crystals. **Langmuir**. 29(18), 5573-5580.

[48] Yamamoto, O. (2001). Influence of particle size on the antibacterial activity of zinc oxide. **Int. J. Inorg. Mater**. 3(7), 643-646.

[49] Yang, P., Yan, H.Q., Mao, S., Russo, R., Johnson, J., Saykally, R., Morris, N., Pham, J., He, R., & Choi, H.J. (2002). [50] [50] Controlled growth of ZnO nanowires and their optical properties. **Adv. Funct. Mater**. 12(5), 323-331.

[51] Yousef, J.M. & Danial, E.N. (2012). In *vitro* antibacterial activity and minimum inhibitory concentration of zinc oxide and nano-particle zinc oxide against pathogenic strains. **J. Health Sci**. 2(4), 38-42.

[52] Zhao, Q.L., Cao, M.S., Yuan, J., Lu, R., Wang, D.W., & Zhang, D.Q. (2010). Thickness effect on electrical properties of $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_{x-3}$ thick films embedded with ZnO nanowhiskers prepared by a hybrid sol-gel route. **Mater. Lett**. 64(5), 632-635.

Thai Journal of Physics Vol. 34 No. 3-4 (2017) 48-53

สมบัติแม่เหล็กและไดเล็กตริกของพอลิเมอร์ผสมแม่เหล็ก

ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

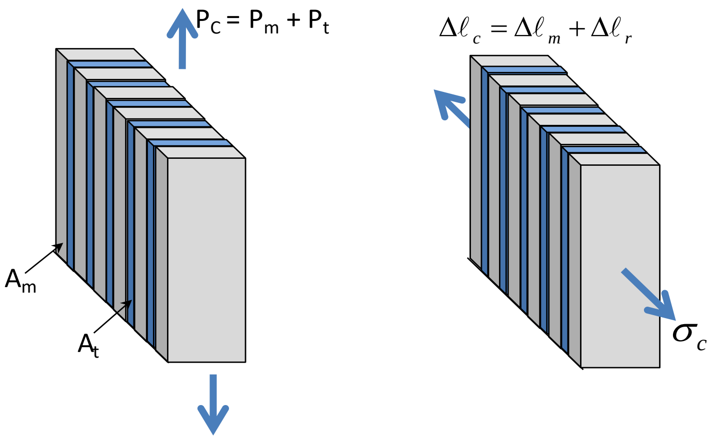
บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ได้รับความสนใจจากวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ เพราะเป็นวัสดุที่ผสานสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของแม่เหล็ก เข้ากับสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงปรากฏการณ์อื่นๆ เช่น Magnetoelectric Effect เป็นต้น บทความนี้กล่าวถึงการใช้กฎการผสม อธิบายสมบัติแม่เหล็กและไดอิเล็กตริกของพอลิเมอร์ที่ผสมผงแม่เหล็ก

การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ (Magnetic Polymer Composite) ในยุคแรกเน้นการผสมแม่เหล็ก Alnico กับ Phenolic Resin จนต่อมาได้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเหล่านี้ให้มีความหลากหลาย มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งแสดงปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอื่นๆ เช่น Magnetoelectric Effect การประยุกต์ของวัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ได้แก่ การใช้งานเป็น แม่เหล็กที่มีน้ำหนักเบาและดัดเป็นรูปต่างๆได้ วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เซนเซอร์ และ ตัวเปลี่ยนพลังงาน เป็นต้น

กฎการผสม (Rule of Mixture)

เมื่อนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน วัสดุใหม่ที่ได้เรียกว่าวัสดุคอมโพสิต (Rule of Mixture) วัสดุเชิงประกอบที่ได้นี้จะมีคุณสมบัติแบบเดียวกับวัสดุตั้งต้นหรือคุณสมบัติแบบใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากการผสม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารตั้งต้น การกระจายตัวและอันตรกิริยาระหว่างวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิด คุณสมบัติส่วนหนึ่งอธิบายด้วย กฎการผสม



รูปที่ 1 แนวการให้ความเค้นและความเครียดที่เกิดในวัสดุคอมโพสิต

กฎของการผสม เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมบัติใดๆ แบบเชิงเส้นของคอมโพสิตกับสมบัติเฉพาะตัวของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ รวมถึงปริมาณเฟส (Phase) ต่าง ๆ โดยมักจะใช้อธิบายสมบัติทางกายภาพ เช่น มอดูลัสของยัง (E) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (α) ความหนาแน่น (ρ) หรือสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้น (σ_1 และ σ_2) ความเครียด (ε_1 และ ε_2)

คุณสมบัติของคอมโพสิตที่ถูกอธิบายด้วยกฎการผสมอย่างง่าย สามารถประเมินสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อคอมโพสิตเชิงวิศวกรรม โดยเฉพาะกับคอมโพสิตที่สังเคราะห์เพื่อการเสริมแรงให้กับวัสดุ (ฟิลเลอร์ที่เป็นเส้นใย) พิจารณาการใช้กฎการผสมในการอธิบายโดยให้ค่าความเค้นและความเครียดคงที่ (Constant-Stress and Constant-Strain) ในแนวขนานและตั้งฉากกับตัวเสริมแรงแสดงดังรูปที่ 1

ถ้าผลรวมของแรงที่ให้แก่คอมโพสิตมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่ให้กับเมทริกซ์และ ฟิลเลอร์ คือ $F_c = F_m + F_f$ และความสัมพันธ์ของความเค้น $\sigma = \frac{F}{A}$ เมื่อ F = โหลด (Load) A = พื้นที่หน้าตัด (Cross sectional) จะได้เป็นสมการที่ (1)

$$P_c = \sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (1)$$

จากกฎของฮุก ($\sigma = E\varepsilon$) จะได้สมการที่ (2)

$$P_c = E_c \varepsilon_c A_c = E_m \varepsilon_m A_m + E_f \varepsilon_f A_f \quad (2)$$

จัดรูปใหม่สมการที่ (2) ใหม่ จะได้เป็นสมการที่ (3)

$$E_c = \left(\frac{A_m}{A_c}\right) E_m + \left(\frac{A_f}{A_c}\right) E_f \quad (3)$$

เมื่อ $\frac{A_m}{A_c}$ คือ พื้นที่หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ เขียนแทนเป็น V_m และ $\frac{A_f}{A_c}$ คือ พื้นที่หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์ เขียนแทนเป็น V_f จึงเขียนสมการที่ (2) ใหม่เป็นสมการที่ (4)

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f \quad (4)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของความเค้น ได้เป็นสมการที่ (5)

$$\sigma_c = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f \quad (5)$$

ฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็กจะทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กแบบเฟร์โร (Ferromagnetism) หรือเฟร์รี (Ferrimagnetism) ในพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ปริมาณที่แสดงความเป็นแม่เหล็กต่างๆ เช่น แรงลบล้างแม่เหล็ก (Coercive field), Maximum energy product, สภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability) และแมกนีไตเซชัน (Magnetization) สามารถวัดได้จากแมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) ที่

แสดงผลเป็นฮีสเทอรีซีสลูป จากผลการวิจัยในคอมโพสิตของยางและเฟอร์ไรต์ [1,2] พบว่า สามารถใช้กฎของการผสม (Rule of mixture) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติแม่เหล็กตามองค์ประกอบของคอมโพสิต ได้เช่นเดียวกับสมบัติเชิงกล เช่นในกรณี แมกนีไตเซชันอิ่มตัวของคอมโพสิต (M_{mpc}) มีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็ก (W_m) กับพอลิเมอร์ที่เป็นเมทริกซ์ (W_p)

$$M_{mpc} = M_m W_m + M_p W_p \tag{6}$$

โดยที่ M_m และ M_p คือแมกนีไตเซชันอิ่มตัวของผงแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ตามลำดับ เนื่องจากพอลิเมอร์ทุกชนิดไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กแบบเฟร์โร หรือ เฟร์รี M_p จึงมีค่าเป็นศูนย์ สมการจึงลดรูปเป็น

$$M_{mpc} = M_m W_m \tag{7}$$

อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดในการใช้กฎของการผสมอธิบายสมบัติแม่เหล็กที่เป็น Combined property ของคอมโพสิต เพราะอันตรกิริยาระหว่างคลัสเตอร์ของฟิลเลอร์แม่เหล็กที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ปริมาณทางแม่เหล็กต่างออกไป เช่น ค่าการลบล้างทางแม่เหล็กไม่แปรผันตรงตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของฟิลเลอร์แม่เหล็ก หรือแม้กระทั่งแมกนีไตเซชันอิ่มตัวของคอมโพสิต ในกรณีปริมาณฟิลเลอร์มากๆ จนถึงค่า Percolation threshold [3] ก็ไม่เพิ่มขึ้นตามสมการ (7)

กฎของการผสม เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมบัติใดๆ แบบเชิงเส้นของคอมโพสิตกับสมบัติเฉพาะตัวของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ รวมถึงปริมาณเฟส (Phase) ต่าง ๆ โดยมักจะใช้อธิบายสมบัติทางกายภาพ เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความหนาแน่น หรือสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้น ความเครียด หรือมอดูลัสของยัง (E) คุณสมบัติของคอมโพสิตที่ถูกอธิบายด้วยกฎการผสมอย่างง่าย สามารถประเมินสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อวิศวกรรมวัสดุ โดยเฉพาะกับคอมโพสิตที่สังเคราะห์เพื่อการเสริมแรงให้กับวัสดุ มีงานวิจัยของ K.K. Chawla [4] ที่ใช้กฎของการผสมวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโลหะ พบว่ากระบวนการเตรียมคอมโพสิตส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทริกซ์ และค่าความเครียดที่วัดได้แสดงให้เห็นถึงขอบเขตระนาบบริเวณพลาสติกหรือบริเวณที่เมทริกซ์แสดงความเป็นพลาสติก ขณะที่เส้นใยโลหะจะแสดงความเป็นอิลาสติก นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลสำคัญอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย เช่น Volume fraction โดยงานวิจัยของ C. Lee et al [5] ใช้กฎการผสมสำหรับทำนายสมบัติของเส้นใยที่จัดเรียงตัวในลักษณะมีทิศทางแน่นอน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้เป็นเชิงเส้นกับกฎการผสม แต่ถ้าการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่มความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้นกับกฎการผสม (Non-linear) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.S. Rangaraj et al [6] ที่วัดค่า Ultimate tensile strengths ที่พบว่าความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่อธิบายว่าเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเส้นใยที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งปัจจัยจากการจัดเรียงแบบสุ่มของเส้นใยในเมทริกซ์ด้วย และได้นำเสนอโมเดลดัดแปลงกฎการผสมตามแบบของ Karam ว่าสามารถยอมรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ Volume fraction ต่ำและยังคงมีค่าที่เที่ยงตรงเมื่อ Volume fraction สูง นอกจากโมเดลของ Karam ที่ถูกเสนอแล้วยังมีโมเดลอีกหลายโมเดลที่ถูกนำเสนอเพื่ออธิบายลักษณะของฟิลเลอร์แต่ละแบบ (อนุภาคหรือเส้นใย) รวมไปถึงความอ่อนและความแข็งของฟิลเลอร์ด้วย แต่ยังคงเงื่อนไขการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน เช่นในงานของ H.S. Kim et al [7] ได้ทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะข้างต้น โดยการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite element) กับยูนิตเซลล์ที่มีแกนสมมาตร (Axisymmetric unit cell) และใช้

กฎการผสมตามโมเดลของ Voigt และ Reuss ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล พบว่ากราฟแสดงระนาบพลาสติก (Plastic Flow Curve) สอดคล้องกับโมเดลของ Voigt ที่ Volume fraction สูง ส่วนที่ Volume fraction ต่ำ สอดคล้องกันทั้งโมเดลของ Voigt และ Reuss ทั้งฟิลเลอร์แบบอ่อนและแบบแข็ง และได้มีความพยายามที่จะกำหนดหรือสร้างเงื่อนไขของลักษณะฟิลเลอร์ให้เป็นรูปทรงที่แน่นอนมากขึ้น เพื่อช่วยในการอธิบายทั้งที่เป็นเส้นใยและอนุภาค G.R.Liu [8] ได้นำเสนอลักษณะของฟิลเลอร์ที่เป็นเส้นใยว่ามีลักษณะแบบทรงกระบอก (Cylinder) และเป็นแบบทรงกลม (Sphere) สำหรับอนุภาค เก็บข้อมูลของค่ามอดูลัสแบบตามยาวพบว่าสอดคล้องกันกับวิธีการอื่น ๆ และยังคงสอดคล้องเมื่อเป็นค่ามอดูลัสแบบแนวขวางและแนวเฉือน อย่างไรก็ตามแต่ ยังมีปัจจัยเกี่ยวกับข้อบกพร่องของคอมโพสิตที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเช่น ช่องว่าง (Blowholes), รอยแตก (Cracks), รอยแยกเฟส (Debonding), รูพรุน (Porosity) ดังนั้น B.K. Sarkar et al [9] ได้วิเคราะห์ข้อบกพร่องในการผสมดังกล่าว โดยดัดแปลงสมการของกฎการผสมเพื่ออธิบายข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น พบว่าที่ระดับข้อบกพร่องเกิน 30 เปอร์เซ็นต์ในเมทริกซ์ที่เป็นเรซิน ยังไม่มีผลต่อความแข็งแรงของคอมโพสิต แต่ข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อยของเส้นใยจะมีผลอย่างมาก ข้อสรุปของความบกพร่องข้างต้น ทำนายที่ปริมาณฟิลเลอร์ใกล้เคียงกับ 40 เปอร์เซ็นต์ในคอมโพสิต ฟิลเลอร์ที่มีลักษณะอื่น เช่น ฟิลเลอร์ที่เป็นไม้ซึ่งมีรูปทรงไม่แน่นอน ดังในงาน C. Burgstaller et al [10] ใช้โมเดลของ Kelly-Tyson ที่ดัดแปลงมาจากกฎการผสมแล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ Volume fraction กับค่าความต้านทานต่อการดึงแบบเชิงเส้นได้ รวมไปถึงการทำนายพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตที่มีสารตั้งต้นมากกว่าสองชนิด ดังงานของ J.F. Luongo-Ortiz et al [11] แสดงความเป็นเชิงเส้นของน้ำหนักรวมกับอันตรกิริยาของสารตั้งต้นมากกว่าสองชนิดโดยกำหนดด้วย Multibody interaction parameters

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Electrical Permittivity)

นอกจากพฤติกรรมทางแม่เหล็กแล้ว ฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้า คือ สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Electrical permittivity) อีกด้วย เนื่องจากผงแม่เหล็กมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงช่วยในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น และประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิว (Surface charge) ของฟิลเลอร์ทำให้โพลาไรเซชันมีค่าสูงขึ้น สมการของวากเนอร์ (Wagner’s equation) สามารถใช้อธิบายค่าไดอิเล็กตริก หรือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ε_{mpc}) ในกระบวนการโพลาไรเซชันของวัสดุคอมโพสิตที่มีอนุภาคทรงกลม โครงสร้างแบบลูกบาศก์ เป็นฟิลเลอร์ปริมาณน้อย ๆ จนปราศจากอันตรกิริยาระหว่างกัน [12]

$$\varepsilon_{mpc} = \varepsilon_p (1 + 3\phi) \qquad (8)$$

โดย ε คือ สภาพยอมของพอลิเมอร์ และ ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์

สมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิตจะวิเคราะห์จากการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ของคอมโพสิต โดยการแสดงความสัมพันธ์กับค่า Volume fraction ซึ่งมีปรากฏการทบทวนโมเดลที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในงานของ K. Lal et al [13] เช่น โมเดลของ Rayleigh (1892), Wagner (1914), Bruggeman (1935), Bottcher (1952), De Loor (1956) และ Van Beek (1967) โดยอธิบายฟิลเลอร์โลหะที่มีลักษณะทรงกลมและไม่เป็นทรงกลม ส่วนการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์นอกจากมีค่าสมบัติทางแม่เหล็กแล้ว ยังสามารถวัดค่าสภาพ ยอมทางไฟฟ้าได้ด้วย เนื่องฟิลเลอร์ที่เป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีว่าเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ และงานของ Gokturk et al [12] ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Volume fraction กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

สมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีความถี่สูง คือ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่คลื่นวิทยุ และไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ จะเกิดการแมกนีไตเซชันของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กตามสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พร้อมไปกับการเกิดโพลาไรเซชันของไดโพลไฟฟ้าตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของฟิลเลอร์แม่เหล็กจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แม็กซ์เวลล์-วากเนอร์ (Maxwell-Wagner effect) [14] ส่งผลให้โพลาไรเซชันที่มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ปราศจากฟิลเลอร์จึงเกิดการดูดกลืนคลื่นมากกว่าพอลิเมอร์ที่ปราศจากฟิลเลอร์ที่คลื่นสามารถทะลุผ่านได้โดยปราศจากอันตรกิริยา ความสามารถในการดูดกลืนคลื่นจึงระบุได้ด้วยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนในกรณีความถี่สูง) ซึ่งมีส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นและองค์ประกอบของคอมโพสิต

สำหรับสภาพซึมได้ของผงแม่เหล็ก เนื่องจากกระบวนการ Ferromagnetic resonance และ Domain wall motion เป็นไปตาม Lorentzian law [15]

$$\mu = \frac{1+(\mu_s - 1)}{1 - i\beta(f - f_r) - (\frac{f}{f_r})^2} \tag{9}$$

โดยที่ β คือ Damping parameter และ f คือความถี่

ส่วนความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) สัมพันธ์กับสภาพซึมได้สถิต (μ_s) ผ่านกระบวนการ Ferromagnetic resonance และ Domain wall motion ตาม Snoek’s law

$$(\mu_s - 1) f_r = \left(\frac{2}{3}\right)(\gamma 4\pi M_s) \tag{10}$$

โดยที่ M_s คือ แมกนีไตเซชันอิ่มตัว และ γ เป็นค่าคงที่

สภาพซึมได้จะลดลงที่ความถี่สูง ซึ่งสามารถขยาย Snoek limit สูงมากกว่า 1 GHz ด้วยการผสมเฟอร์ไรต์กับพอลิเมอร์ เมื่อผงแม่เหล็กกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ สามารถใช้กฎของการผสม ในการอธิบายค่าของสภาพยอมและสภาพซึมได้ [16] ตามสูตรของ Maxwell-Garnet

$$K = K_1(1 + \frac{3\phi\beta}{1 - \phi\beta}) \tag{11}$$

หรือสูตรของ Bruggeman-Hanai

$$\frac{K-K_2}{K_1-K_2}\left(\frac{K_1}{K}\right)^{\frac{1}{3}}=1-\phi \tag{12}$$

โดยที่ K คือ สภาพยอม (ε) หรือ สภาพซึมได้ (μ) ของคอมโพสิต

K_1 คือ สภาพยอม (ε) หรือสภาพซึมได้ (μ) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์

K_2 คือ สภาพยอม (ε) หรือสภาพซึมได้ (μ) ของฟิลเลอร์เฟอร์ไรต์

$\beta=\frac{K-K_1}{K_2+2K_1}$ และ ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์เฟอร์ไรต์

ซึ่งสูตรเหล่านี้ สามารถใช้อธิบายผลการวัดสภาพยอม และ สภาพซึมได้ ของ ยางธรรมชาติ พอลียูรีเทน พอลีโพรไพลีน ที่ผสมโคบอลต์เฟอร์ไรต์ [17, 18] และ ยางธรรมชาติที่ผสมนีโอดีเมียมไอออนโบรอน [19] ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] M.H. Makled, T. Matsui, H. Tsuda, H. Mabuchi, M.K. El-Mansy and K. Morii, J. Mater. Process. Technol. 160, 229 (2005).

[2] M.R. Anantharaman, K.A. Malini, S. Sindhu, E.M. Mohammed, S.K. Date, S.D. Kulkarni, P.A. Joy and P. Kurian, Bull. Mater. Sci. 24, 623 (2001).

[3] T.J. Fiske, H.S. Gokturk and D.M. Kalyon, J. Mater. Sci. 32, 5551 (1997).

[4] K.K. Chawla, Rev. Bras. Fis. 4(3), 411 (1974).

[5] C. Lee and W. Hwang, J. Mater. Sci. Lett. 17, 1601 (1998).

[6] S.S. Rangaraj and S.B. Bhaduri, J. Mater. Sci. 29, 2795 (1994).

[7] H.S. Kim, S.I. Hong, and S.I. Kim, J. Mater. Process. Technol. 112, 109 (2001).

[8] G.R. Liu, Compos. Struct. 40, 313 (1998).

[9] B.K. Sarkar, Bull. Mater. Sci. 21, 329 (1998).

[10] C. Burgstaller and W. Stadlbauer, 13th European conference of Composite Materials (ECCM13), Stockholm, Sweden (2008).

[11] J.F. Luongo-Ortiz and K.E. Starling, Fluid Phase Equilib.132, 159 (1997).

[12] H.S. Gokturk, T.J. Fiske and D.M. Kalyon, IEEE Trans. Magn. 29, 4170 (1993).

[13] K Lal and R Parshad, J. Phys. D: Appl. Phys. 6, 1788 (1973).

[14] E.T. Thostenson and T.W. Chou, Compos. Part A-Appl Sci. Manufac. 1055 (1999).

[15] A.N. Lagarkov and K.N. Rozanov, J. Magn. Magn. Mater. 321, 2082 (2009).

[16] B.W. Li, Y. Shen, Z.X. Yue and C.W. Nan, J. Magn. Magn. Mater. 313, 322 (2007).

[17] A. Hunyek, C. Sirisathitkul and P. Jantaratana, Plast. Rubber Compos. 42, 89 (2013).

[18] A. Hunyek and C. Sirisathitkul, Polym.-Plast. Technol. Eng. 50, 593 (2011).

[19] P. Jantaratana, C. Sirisathitkul, A. Hunyek and S. Maensiri, Adv. Compos. Lett. 20, 48 (2011).