

Carbon Quantum Dots ในเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์อาหาร (Carbon Quantum Dots in Food Packaging Technology)

คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon Quantum Dots: CQDs) เป็นวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก โดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 10 นาโนเมตร และมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ การเรืองแสง ความสามารถในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ความเสถียรทางเคมี และความเข้ากันได้กับระบบชีวภาพ สมบัตินี้ดังกล่าวทำให้ CQDs ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางสำหรับการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์แอคทีฟและบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

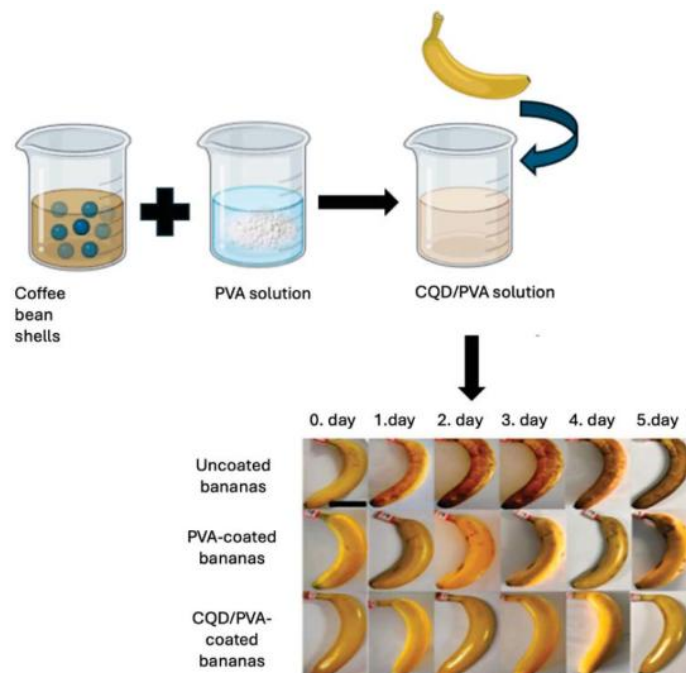
การเติม CQDs ลงในฟิล์ม สารเคลือบ หรือวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต สามารถช่วยเพิ่มสมบัติต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพ เสริมความแข็งแรงเชิงกล ปรับปรุงสมบัติกันก๊าซและไอน้ำ เพิ่มความเสถียรทางความร้อน ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต และสนับสนุนการพัฒนากระบวนการตรวจสอบความสดของอาหาร นอกจากนี้ CQDs ยังสามารถสังเคราะห์จากชีวมวล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอาหาร จึงมีศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรและสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

การประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

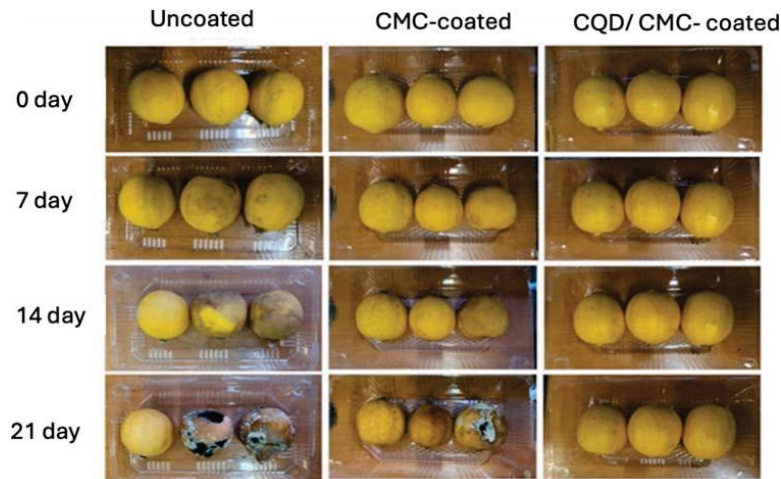
บรรจุภัณฑ์แอคทีฟทำหน้าที่ปรับปรุงสภาพแวดล้อมภายในบรรจุภัณฑ์หรือยับยั้งกระบวนการที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ การเติม CQDs ลงในพอลิเมอร์หรือไบโอพอลิเมอร์ในปริมาณต่ำสามารถช่วยเพิ่มสมบัติต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุอย่างเด่นชัด

สมบัติต้านอนุมูลอิสระของ CQDs มีบทบาทในการลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนสี การเสื่อมของกลิ่นรส การสูญเสียสารอาหาร และการเกิดกลิ่นหืนในอาหาร ส่วนสมบัติต้านจุลชีพสามารถช่วยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย เชื้อรา และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของอาหาร

CQDs สามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของฟิล์มหรือสารเคลือบสำหรับอาหารหลายประเภท เช่น เนื้อสัตว์ อาหารทะเล ผลิตภัณฑ์สัตว์ปีก ผัก และผลไม้ โดยเฉพาะสารเคลือบจากไบโอพอลิเมอร์ที่ผสม CQDs ซึ่งมีศักยภาพในการชะลอการเกิดสีน้ำตาล ลดการสูญเสียน้ำ และยับยั้งการเจริญของเชื้อราบนผิวผลไม้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้สารเคลือบที่มี CQDs โดยตรงบนอาหารยังอยู่ในระดับการวิจัย และจำเป็นต้องประเมินความปลอดภัยอย่างรอบด้านก่อนนำไปใช้เชิงพาณิชย์



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงสารละลายเคลือบ CQD/PVA และภาพเปรียบเทียบกล้วยที่เคลือบและไม่เคลือบในแต่ละช่วงเวลาการเก็บรักษา (ที่มา <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03854-1>)



รูปที่ 2 ภาพเลมอนที่ไม่เคลือบ (ชุดควบคุม) เลมอนที่เคลือบด้วย carboxymethylcellulose (CMC) และเลมอนที่เคลือบด้วยสารเคลือบบริโกลด์ CQD/CMC ระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน

การเสริมสมบัติเชิงกลของวัสดุบรรจุภัณฑ์

CQDs สามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงระดับนาโนในโครงสร้างพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับสายโซ่พอลิเมอร์ การกระจายตัวของ CQDs อย่างสม่ำเสมอช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างองค์ประกอบ ลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนแรงภายในวัสดุ

การเติม CQDs ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงของฟิล์ม ขณะเดียวกันอาจช่วยรักษาความยืดหยุ่นและลดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวหรือฉีกขาดระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการเสริมแรงขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ปริมาณ CQDs การกระจายตัว และความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวอนุภาคกับเมทริกซ์ หากเติม CQDs ในปริมาณสูงเกินไป อนุภาคอาจรวมกลุ่มและกลายเป็นตำแหน่งสะสมความเค้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุลดลงได้

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

สมบัติการเรืองแสงเป็นลักษณะสำคัญที่ทำให้ CQDs เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ บรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ทำหน้าที่ตรวจสอบและสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพ ความสด หรือสถานะการเก็บรักษาของอาหาร โดยอาจอยู่ในรูปเซ็นเซอร์ ฉลากอัจฉริยะ หรือหมึกตรวจวัด

การเสื่อมเสียของอาหารมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง รวมถึงการสร้างกรด ต่าง หรือสารประกอบไนโตรเจนระเหยง่าย CQDs สามารถนำมาใช้ร่วมกับสารบ่งชี้สี เพื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณ ปรับปรุงความไวในการตรวจวัด และทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีหรือการเรืองแสงสังเกตได้ชัดเจนขึ้น

ระบบดังกล่าวช่วยให้ผู้บริโภคหรือผู้ประกอบการสามารถประเมินความสดของผลิตภัณฑ์ได้โดยไม่ต้องเปิดบรรจุภัณฑ์ และอาจช่วยลดการบริโภคอาหารที่เสื่อมเสีย รวมถึงลดการทิ้งอาหารที่ยังคงมีคุณภาพ อย่างไรก็ตาม การออกแบบเซ็นเซอร์จำเป็นต้องพิจารณาความจำเพาะต่อสารเป้าหมาย ความเสถียรของสัญญาณ ผลกระทบจากอุณหภูมิและความชื้น และความชัดเจนในการแปลผลของผู้ใช้

การปรับปรุงสมบัติกันของฟิล์มและสารเคลือบ

สมบัติกันก๊าซและไอน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการรักษาคุณภาพอาหาร เนื่องจากการแพร่ผ่านของออกซิเจนและความชื้นอาจเร่งการเกิดออกซิเดชัน การสูญเสียน้ำ การดูดซับความชื้น และการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

การเติม CQDs ลงในไบโอพอลิเมอร์สามารถช่วยลดช่องว่างอิสระภายในโครงสร้างวัสดุ และทำให้โมเลกุลของก๊าซหรือไอน้ำต้องแพร่ผ่านเส้นทางที่ยาวและซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง CQDs กับสายโซ่พอลิเมอร์อาจทำให้เมทริกซ์มีความหนาแน่นและต่อเนื่อง ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำลดลง

CQDs ที่มีสมบัติด้านอนุมูลอิสระยังสามารถทำงานร่วมกับสมบัติกันออกซิเจนของฟิล์ม โดยช่วยลดทั้งปริมาณออกซิเจนที่แพร่เข้าสู่บรรจุภัณฑ์และปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นภายในอาหาร แนวทางนี้มีศักยภาพในการลดการใช้สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์และส่งเสริมการใช้สารออกฤทธิ์จากแหล่งธรรมชาติ

ความเสถียรทางความร้อนและการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ CQDs สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับสายโซ่พอลิเมอร์และจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ส่งผลให้วัสดุมีความคงตัวต่อความร้อนเพิ่มขึ้น สมบัติดังกล่าวมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต การปิดผนึก และการเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

CQDs ยังสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตและลดการส่องผ่านของแสง จึงช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของอาหารที่ไวต่อแสง เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การสลายตัวของรงควัตถุ และการสูญเสียวิตามินบางชนิด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตต้องพิจารณาพร้อมกับความโปร่งใสของฟิล์ม เนื่องจากบรรจุภัณฑ์บางประเภทจำเป็นต้องมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในอย่างชัดเจน

ศักยภาพด้านการย่อยสลายทางชีวภาพ

CQDs ที่ผลิตจากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งสามารถนำมาใช้ร่วมกับไบโอพอลิเมอร์เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์คอมพอสิตที่มีสมบัติการใช้งานดีขึ้น และยังคงมีศักยภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพ ในบางระบบ CQDs อาจเพิ่มความชอบน้ำ ความพรุน หรือจำนวนตำแหน่งที่น้ำและจุลินทรีย์สามารถเข้าถึงได้ จึงอาจช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายของวัสดุ

อย่างไรก็ตาม ผลของ CQDs ต่อการย่อยสลายขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ แหล่งวัตถุดิบ กระบวนการสังเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ปริมาณการเติม และสภาวะแวดล้อม จึงไม่สามารถสรุปได้ว่า CQDs ทุกชนิดจะช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายของวัสดุบรรจุภัณฑ์ในทุกระบบ

ข้อจำกัดและแนวทางการพัฒนา

แม้ CQDs จะมีศักยภาพสูง แต่การนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารระดับอุตสาหกรรมยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบและสมบัติของ CQDs จากวัตถุดิบต่างชนิด การควบคุมขนาดอนุภาคและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ความสามารถในการกระจายตัวในพอลิเมอร์ และความคงตัวระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา

ประเด็นสำคัญอีกด้านหนึ่งคือความปลอดภัย จำเป็นต้องศึกษาการเคลื่อนย้าย (migration) ของ CQDs หรือสารตกค้างจากวัสดุบรรจุภัณฑ์เข้าสู่อาหาร รวมถึงความเป็นพิษต่อเซลล์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และผลกระทบระยะยาว การทดสอบควรครอบคลุมอาหารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่น อาหารที่มีไขมันสูง อาหารที่มีความเป็นกรด และอาหารที่มีความชื้นสูง ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

นอกจากนี้การขยายกำลังการผลิต การควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิต ต้นทุน และข้อกำหนดทางกฎหมายสำหรับวัสดุสัมผัสอาหาร เป็นปัจจัยที่ต้องได้รับการพิจารณาก่อนการนำเทคโนโลยีไปใช้ในเชิงพาณิชย์

ที่มาของข้อมูล

1. Aksu, M., Güzdemir, Ö. (2025), Food Waste-Derived Carbon Quantum Dots and Their Applications in Food Technology: A Critical Review. *Food Bioprocess Technol* 18: 6753–6778.
(<https://doi.org/10.1007/s11947-025-03854-1>)