

กราฟีนและอนุพันธ์ในบรรจุภัณฑ์อาหารชีวภาพสมรรถนะสูง (Graphene and Derivatives for High-Performance Biopolymer Food Packaging)

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการปนเปื้อนและการเสื่อมสภาพทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ระหว่างการผลิต การเก็บรักษา การขนส่ง และการจัดจำหน่าย การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมจึงช่วยรักษาคุณภาพ ความปลอดภัย และยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

วัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ พลาสติก กระดาษ แก้ว และโลหะ โดยเฉพาะพอลิเมอร์จากปิโตรเลียม (petroleum-based polymers) เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene (PE)) พอลิพรอพิลีน (polypropylene (PP)) และพอลิเอสเตอ์ (polyester) ซึ่งนิยมใช้เนื่องจากขึ้นรูปง่าย ต้นทุนต่ำ และมีสมบัติการกั้น (barrier properties) ต่อความชื้น ออกซิเจน แสง และจุลินทรีย์ได้ดี อย่างไรก็ตามพลาสติกจากปิโตรเลียมส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (non-biodegradable) และสะสมในระบบนิเวศเป็นเวลานาน การพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymers) และพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymers) จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น ตัวอย่างวัสดุที่มีศักยภาพ ได้แก่ ไคโตซาน (chitosan) เจลาติน (gelatin) แป้ง (starch) และเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นทรัพยากรหมุนเวียน (renewable resources) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

แม้วัสดุเหล่านี้มีข้อได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงเชิงกล สมบัติการกั้น ความเสถียรทางความร้อน และความสามารถในการต้านจุลชีพ หรือต้านอนุมูลอิสระ การปรับปรุงสมบัติของวัสดุจึงเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถใช้งานได้จริง

บทบาทของวัสดุนาโนในบรรจุภัณฑ์อาหาร

การเติมวัสดุนาโนลงในโครงสร้างพอลิเมอร์เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจในการยกระดับสมรรถนะของวัสดุบรรจุภัณฑ์ วัสดุนาโนสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อความร้อน และสมบัติการกั้น รวมถึงเพิ่มหน้าที่เฉพาะ เช่น การต้านจุลชีพ การป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

วัสดุสองมิติ (two-dimensional materials (2DMs)) เป็นวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ความหนาในระดับนาโน และมีขนาดด้านข้างมากกว่าความหนาหลายเท่า ตัวอย่างวัสดุในกลุ่มนี้ ได้แก่ transition metal dichalcogenides (TMDs), MXenes, graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), hexagonal boron nitride (h-BN), layered double hydroxides (LDHs) และวัสดุในกลุ่มกราฟีน

ทั้งนี้วัสดุสองมิติมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (aspect ratio) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง จึงสามารถสร้างอันตรกิริยา (interactions) กับสายโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะกราฟีน (graphene) และอนุพันธ์ ได้แก่ กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide (GO)) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide (rGO)) ซึ่งมีศักยภาพสูงสำหรับใช้เป็นสารเติมแต่งระดับนาโน (nanofillers) ในวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร

โครงสร้างและสมบัติของกราฟีนและอนุพันธ์

1. กราฟีน (Graphene)

กราฟีนเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอม หรือชั้นเดี่ยว (monolayer) อะตอมคาร์บอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะที่มีการไฮบริไดเซชันแบบ sp^2 (sp^2 hybridization) และจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง (honeycomb lattice) ดังรูปที่ 1A

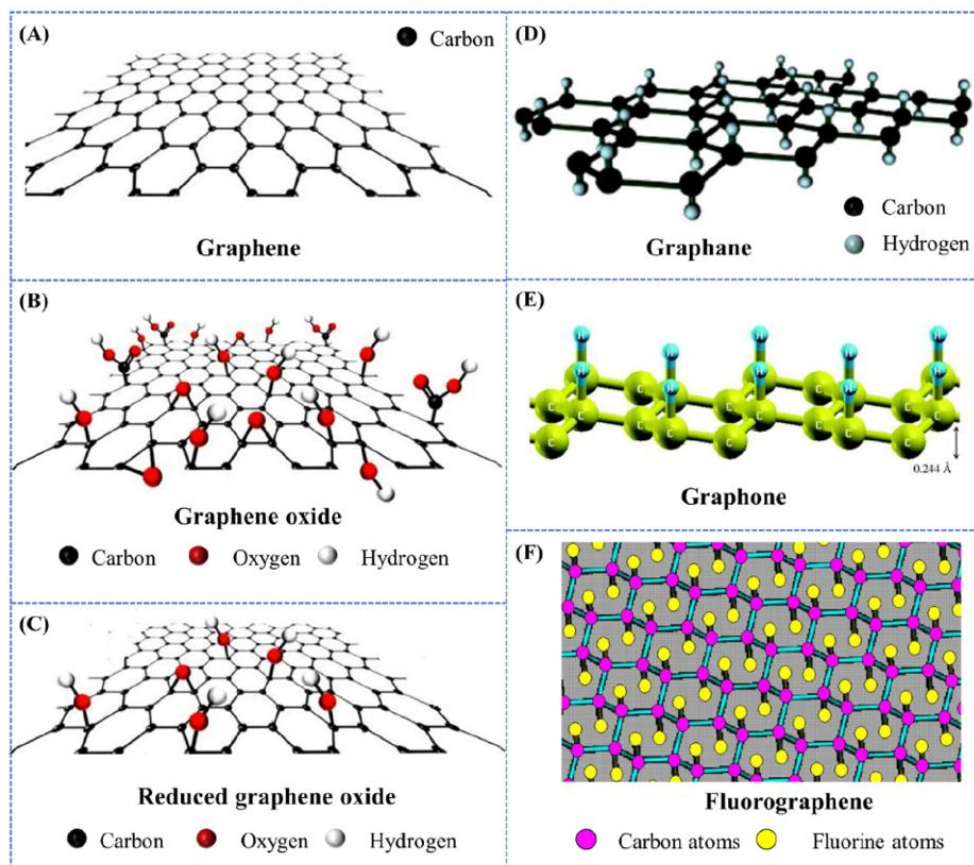
อิเล็กตรอนในออร์บิทัลไพ (π orbital) สามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างเป็น delocalized electron network ส่งผลให้กราฟีนมีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง

กราฟีนมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวมากกว่า 2,000 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะทางทฤษฎีประมาณ 2,630 ถึง 2,956 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ประมาณ 1.0 เทราปาสคาล ความต้านทานต่อการแตกหัก (fracture strength) ประมาณ 130 จิกะปาสคาล และค่าการนำความร้อนประมาณ 5,000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ขณะเดียวกันกราฟีนสามารถให้แสงผ่านได้ประมาณร้อยละ 97.7

เมื่อนำกราฟีนไปกระจายในพอลิเมอร์อย่างเหมาะสม แผ่นกราฟีนจะเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางการแพร่ผ่าน (tortuous diffusion pathway) ของออกซิเจน ไอน้ำ และก๊าซอื่น ทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความเสถียรทางความร้อน การป้องกันแสง และประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของวัสดุบรรจุภัณฑ์

อย่างไรก็ตามกราฟีนมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) และมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นก้อน (agglomeration) จึงอาจกระจายตัวในพอลิเมอร์บางชนิดได้ยาก การปรับสภาพพื้นผิวจึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างกราฟีนกับพอลิเมอร์

การปรับสภาพกราฟีนสามารถดำเนินการได้ทั้งแบบโคเวเลนต์ (covalent modification เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction)) และแบบนอนโคเวเลนต์ (non-covalent modification) ซึ่งได้แก่ อันตรกิริยา π - π interactions แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions)



รูปที่ 1. โครงสร้างของกราฟีนและอนุพันธ์ของกราฟีน (A) กราฟีน (Graphene), (B) กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide), (C) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide), (D) กราเฟน (Graphane), (E) กราโฟน (Graphone) และ (F) ฟลูออโรกราฟีน (Fluorographene) (ที่มา <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2026.108901>)

2. กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide (GO))

GO เป็นอนุพันธ์ของกราฟีนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน โครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่มีพันธะทั้งแบบ sp^2 และ sp^3 พร้อมด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (oxygen-containing functional groups) เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่อีพอกไซด์ (epoxide group) บนระนาบและบริเวณขอบของแผ่นวัสดุ

หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวทำให้ GO มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) และสามารถกระจายตัวในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ และพอลิเมอร์ที่มีขั้วได้ดีกว่ากราฟีน นอกจากนี้ GO ยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนหรืออันตรกิริยาบริเวณพื้นผิวสัมผัส (interfacial interactions) กับสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติการกันของวัสดุคอมโพสิตได้

แม้ GO จะมีค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าต่ำกว่ากราฟีน แต่มีข้อได้เปรียบด้านการกระจายตัว ความสามารถในการดัดแปลงทางเคมี และความสะดวกในการแปรรูปในปริมาณมาก โดยแผ่น GO ชั้นเดียวมีขนาดด้านข้าง (lateral size) ตั้งแต่ประมาณ 10 นาโนเมตรจนถึงมากกว่า 20 ไมโครเมตร ขณะที่มีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร ขนาดและรูปร่างของแผ่น GO มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต เช่น การซึมผ่านของน้ำ ความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (seal strength) ความปลอดภัยทางชีวภาพ (biosafety) และการเคลื่อนย้ายไอออน (ion transport) ในขณะที่แผ่น GO ที่มีขนาดใหญ่และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอสามารถเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดี อย่างไรก็ตาม การรวมตัวเป็นก้อนของ GO ทำให้ช่องว่างภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติการกั้นลดลง

3. รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide (rGO))

rGO ผลิตจากการรีดิวซ์ GO เพื่อลดปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและฟื้นฟูโครงสร้างคาร์บอนแบบ sp^2 บางส่วน กระบวนการดังกล่าวทำให้ rGO มีโครงสร้างใกล้เคียงกับกราฟีนมากขึ้น มีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น และมีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนสูงกว่า GO

เมื่อเติม rGO ลงในพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ rGO สามารถช่วยลดการดูดซึมน้ำและการละลายน้ำ พร้อมทั้งเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติการกั้น แผ่น rGO ยังสามารถขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลก๊าซและไอน้ำภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ จึงมีศักยภาพในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

rGO ยังมีความสามารถในการต้านแบคทีเรีย (antibacterial activity) โดยขอบที่คมของแผ่นวัสดุอาจสร้างความเสียหายเชิงกล (mechanical damage) ต่อเยื่อหุ้มเซลล์จุลินทรีย์ ขณะที่ความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) และอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวอาจรบกวนกระบวนการทำงานของเซลล์

ประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของ rGO ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ปริมาณ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และระดับการกระจายตัวอย่างใดก็ตามการเติม rGO ในปริมาณสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อน ลดความสม่ำเสมอของโครงสร้าง และสร้างจุดอ่อนภายในวัสดุ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติการกั้นลดลง ดังนั้นการกำหนดปริมาณ rGO และการควบคุมการกระจายตัวให้เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposites) สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร

4. อนุพันธ์อื่นของกราฟีน (Other Graphene Derivatives)

นอกจากกราฟีน GO และ rGO ยังมีอนุพันธ์อื่นที่ได้รับการศึกษา ได้แก่ คาร์บอนควอนตัมดอต (carbon quantum dots: CQDs) กราเฟน (graphane) กราโฟน (graphone) ฟลูออโรกราฟีน (fluorographene) กราฟไดอิน (graphdiyne) และกราฟีนเจือปน (doped graphene)

กราเฟนเป็นอนุพันธ์ของกราฟีนที่อะตอมคาร์บอนเกิดพันธะกับไฮโดรเจนอย่างสมบูรณ์ (fully hydrogenated graphene) จึงมีโครงสร้างและสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างจากกราฟีน โดยได้รับการศึกษาสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) เทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจน เทคโนโลยีชีวภาพ และระบบนำส่งสารชีวภาพ (biological delivery systems)

กราโฟนเป็นกราฟีนที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนเพียงบางส่วน (partially hydrogenated graphene) และประกอบด้วยพันธะคาร์บอนทั้งแบบ sp^2 และ sp^3 ส่วนฟลูออโรกราฟีนผลิตจากกระบวนการเติมฟลูออรีนให้แก่กราฟีน (fluorination) หรือการลอกชั้นจากกราฟต์ฟลูออไรด์ (graphite fluoride)

ฟลูออโรกราฟีนมีช่องว่างแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (electronic band gap) กว้างและมีความเสถียรทางเคมีสูง จึงมีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายภาพทางชีวภาพ (bioimaging) และเทคโนโลยีพลังงาน

ความปลอดภัยและข้อจำกัด

การนำกราฟีนและอนุพันธ์มาใช้ในวัสดุสัมผัสอาหาร (food-contact materials) จำเป็นต้องประเมินความปลอดภัยอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโน (nanoparticle migration) หรือสารเคมีตกค้างจากกระบวนการผลิตเข้าสู่อาหาร

ประเด็นที่ควรพิจารณาประกอบด้วยความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) ผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ การสะสมในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายหลังการใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม (industrial scalability) ต้นทุนการผลิต ความสม่ำเสมอของคุณภาพ และข้อกำหนดด้านกฎหมายสำหรับวัสดุสัมผัสอาหาร

การประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment (LCA)) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่านำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ที่มีกราฟีนเป็นองค์ประกอบ ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การใช้งาน จนถึงการจัดการหลังการใช้งาน

ที่มาของข้อมูล

1. J. Liu, Q. Zhao, J. Huang, Y. Hu, (2026) Graphene and its derivatives in biopolymer-based food packaging: Structures, physical properties, applications, migration properties and safety issues. *Food Bioscience* 80, e108901. (<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2026.108901>)