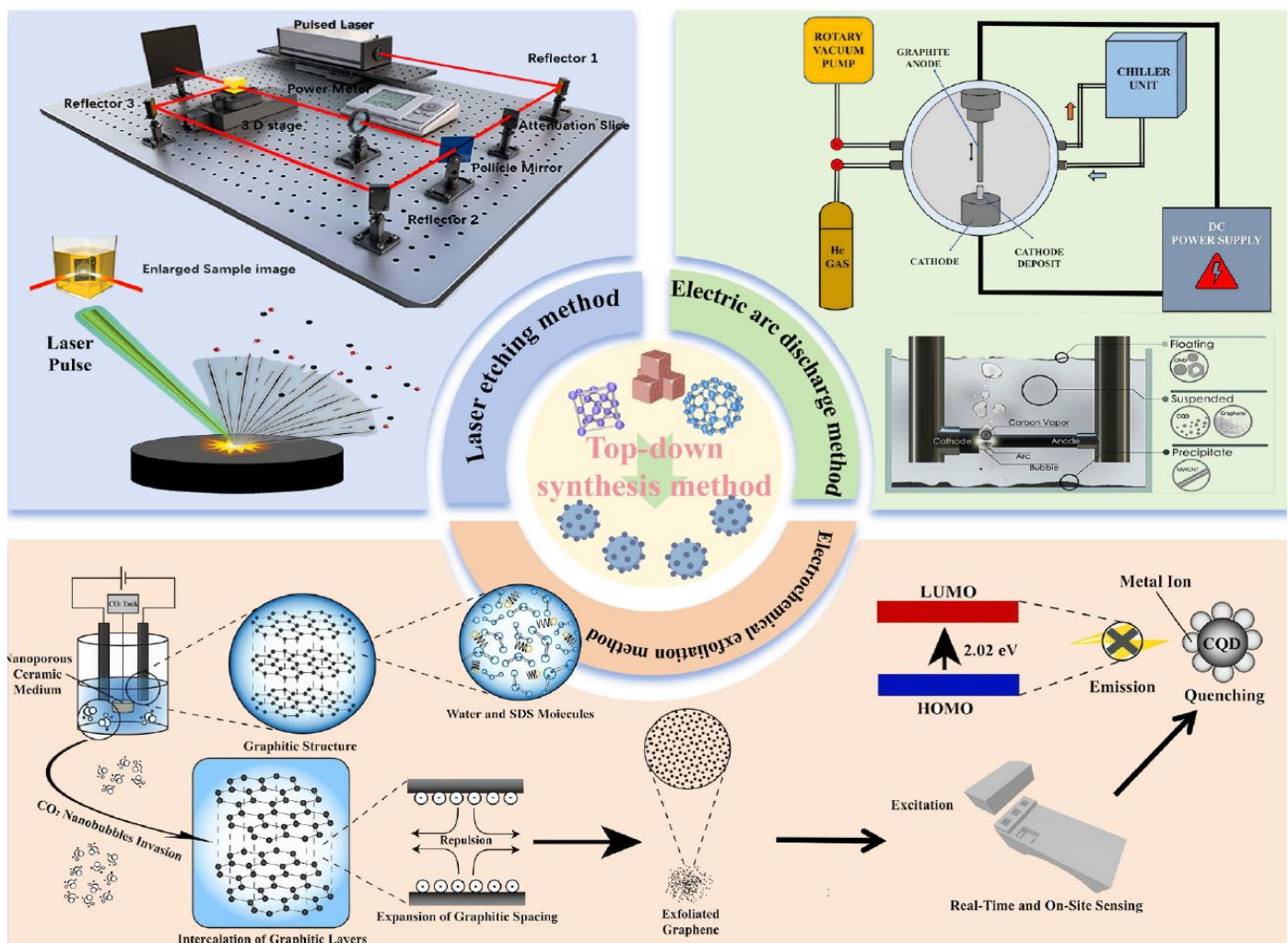


การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอต: แบบ Top-down และ Bottom-up (Preparation of Carbon Quantum Dots: Top-Down and Bottom-Up Approaches)

คาร์บอนควอนตัมดอต (Carbon Quantum Dots; CQDs) สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี โดยหลักใหญ่แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การสังเคราะห์แบบ top-down และ การสังเคราะห์แบบ bottom-up ซึ่งทั้งสองแนวทางมีหลักการแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ วิธีแบบ top-down เริ่มจากวัสดุคาร์บอนขนาดใหญ่แล้วทำให้แตกตัวหรือถูกลอกชั้นจนเกิดเป็นอนุภาคระดับนาโน ขณะที่วิธีแบบ bottom-up เริ่มจากสารตั้งต้นโมเลกุลขนาดเล็ก โอลิโกเมอร์ หรือชีวมวล แล้วทำให้เกิดการคาร์บอนไอเซชันและการประกอบตัวจนได้เป็น CQDs ในที่สุด

การเลือกวิธีสังเคราะห์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากชนิดของสารตั้งต้น วิธีการเตรียม และสภาวะปฏิกิริยาล้วนส่งผลต่อขนาด องค์ประกอบผิว หมู่ฟังก์ชัน สมบัติการเรืองแสง ตลอดจนประสิทธิภาพการใช้งานของ CQDs บทความทั้งสองฉบับสะท้อนตรงกันว่า แม้ CQDs จะเป็นวัสดุนาโนที่มีศักยภาพสูง แต่คุณสมบัติของวัสดุที่ได้จะขึ้นกับเส้นทางการสังเคราะห์อย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อมุ่งประยุกต์ใช้ในด้านอาหาร บรรจุภัณฑ์ หรือเทคโนโลยีตรวจวัด



รูปที่ 1 การสังเคราะห์ CQDs ด้วยวิธีแบบ Top-down โดย H. Xue และคณะ

การสังเคราะห์แบบ Top-down

การสังเคราะห์แบบ top-down เป็นแนวทางที่เริ่มต้นจากวัสดุคาร์บอนขนาดใหญ่ เช่น กราไฟต์ กราฟีน คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนแบล็ก หรือ activated carbon แล้วทำให้แตกตัวหรือถูกลอกออกจนกลายเป็นคาร์บอนควอนตัมดอต (CQDs) ระดับนาโนด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี โดยอาศัยแรงภายนอกที่ค่อนข้างรุนแรง เช่น อุณหภูมิสูง สารออกซิไดซ์ การอาร์กไฟฟ้า การยิงเลเซอร์ หรือการลอกชั้นด้วยไฟฟ้าเคมี

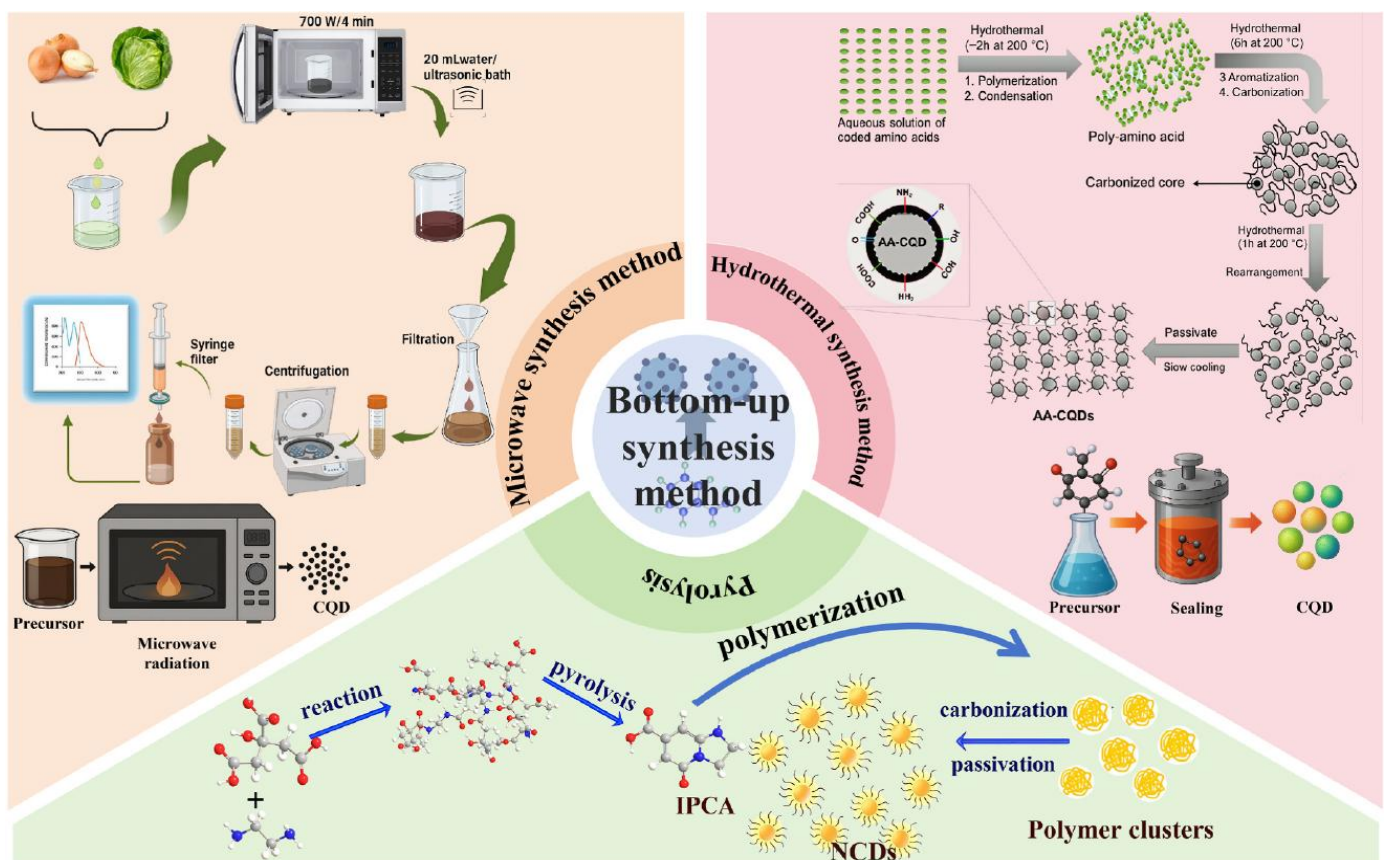
วิธีที่พบได้บ่อยในกลุ่มนี้ ได้แก่

- Laser ablation หรือ laser etching เป็นวิธีที่ใช้พลังงานจากลำแสงเลเซอร์ทำให้สารตั้งต้นคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวเป็นอนุภาคระดับนาโน ตัวอย่างเช่น มีการเตรียม CQDs จากผงกราไฟท์ ซึ่งให้อนุภาคที่มีสมบัติการเรืองแสงและความเสถียรที่ดี นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเป็นระบบเลเซอร์แบบสองลำแสงเพื่อเพิ่ม quantum yield และช่วยให้ควบคุมการกระจายขนาดอนุภาคได้ดีขึ้น

- Electrochemical exfoliation เป็นวิธีที่อาศัยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าในการลอกชั้นวัสดุคาร์บอน เช่น กราไฟท์ ให้กลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโน ตัวอย่างเช่น มีการใช้แท่งกราไฟท์เป็นขั้วไฟฟ้าและใช้อิเล็กโทรไลต์อินทรีย์เพื่อเตรียม CQDs ซึ่งได้อนุภาคที่มีสมบัติการเรืองแสงที่ดี อีกตัวอย่างหนึ่งคือการเตรียม Al-CQDs ด้วยวิธี electrochemical exfoliation ซึ่งได้อนุภาคขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.7 นาโนเมตร และมีสมบัติในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและการเรืองแสงที่เด่นชัด

- Arc discharge เป็นวิธีที่ใช้สภาวะการคายประจุพลังงานสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพื่อสร้างอนุภาคคาร์บอนระดับนาโน และถือเป็นหนึ่งในเส้นทางสำคัญของการสังเคราะห์ CQDs ตัวอย่างเช่น มีการเตรียม CQDs แบบ underwater arc discharge โดยปรับค่าแรงดัน กระแส และเวลาในการคายประจุ จนได้อนุภาคขนาดประมาณ 1–5 นาโนเมตร และมี fluorescence quantum yield รว 16% อีกตัวอย่างหนึ่งคือการดอปด้วยธาตุโบรอนและไนโตรเจน ซึ่งช่วยให้ CQDs ให้การเรืองแสงสีน้ำเงินเด่นชัดมากขึ้น

ข้อดีสำคัญของการสังเคราะห์แบบ top-down คือ สามารถใช้วัสดุคาร์บอนขนาดใหญ่ที่มีราคาต่ำและหาได้ง่าย อีกทั้งยังมักถูกมองว่าเหมาะต่อการผลิตในระดับปริมาณมาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ กระบวนการค่อนข้างซับซ้อน อาจต้องใช้สภาวะที่รุนแรง มีความเสี่ยงต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการทางเคมีบางขั้นตอน และมักควบคุมขนาดอนุภาคและสมบัติการเรืองแสงของผลิตภัณฑ์ได้ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 2 การสังเคราะห์ CQDs ด้วยวิธีแบบ Bottom-up โดย H. Xue และคณะ

การสังเคราะห์แบบ Bottom-up

การสังเคราะห์แบบ bottom-up เป็นแนวทางที่เริ่มจากสารตั้งต้นโมเลกุลขนาดเล็ก โอลิโกเมอร์ หรือแหล่งคาร์บอนจากชีวมวล แล้วทำให้เกิดกระบวนการคาร์บอนในเซชันและการประกอบตัวภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ จนได้เป็นคาร์บอนควอนตัมดอต (CQDs) วิธีนี้อาศัยการ “สร้าง” อนุภาคขึ้นใหม่จากหน่วยย่อยขนาดเล็ก จึงเหมาะกับงานที่ต้องการควบคุมขนาดองค์ประกอบผิว และสมบัติของวัสดุอย่างแม่นยำ

วิธีที่พบได้บ่อยในกลุ่มนี้ ได้แก่

- Hydrothermal/solvothermal synthesis เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นในระบบปิดภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อเร่งการคาร์บอนในเซชันและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างคาร์บอนจนเกิดเป็น CQDs ตัวอย่างเช่น มีการเตรียม CQDs จากกรดซิตริกร่วมกับสารประกอบที่เป็นแหล่งไนโตรเจน ซึ่งช่วยให้ได้อนุภาคที่มีสมบัติการเรืองแสงดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดอะมิโนเป็นสารตั้งต้นเพื่อควบคุมขนาดอนุภาคและเพิ่มประสิทธิภาพการเรืองแสงของ CQDs

- Microwave-assisted synthesis เป็นวิธีที่ใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นอย่างรวดเร็ว ช่วยลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ และมักถูกมองว่าเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานและมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น มีการเตรียม CQDs จากกรดซิตริกและยูเรีย ซึ่งให้อนุภาคที่มีสมบัติทางแสงดีและค่า quantum yield สูง นอกจากนี้ยังมีการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น หัวหอมและกะหล่ำปลี เพื่อเตรียม CQDs ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ด้านการตรวจวัดทางชีวภาพได้

- Pyrolysis เป็นวิธีที่อาศัยการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการสลายตัวและคาร์บอนในเซชันจนได้เป็น CQDs วิธีนี้มีข้อดีคือกระบวนการไม่ซับซ้อนและสามารถใช้วัตถุดิบจากชีวมวลหรือขยะอาหารได้ ตัวอย่างเช่น มีการเตรียม CQDs จากกลูโคสและกรดแอสปาร์ติก ซึ่งให้อนุภาคขนาดเล็กและมีความเสถียรดี นอกจากนี้ยังมีการใช้เปลือกแตงโมและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นสารตั้งต้น เพื่อสะท้อนศักยภาพของวิธีนี้ในด้านการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ข้อดีสำคัญของการสังเคราะห์แบบ bottom-up คือ สามารถควบคุมขนาดอนุภาค หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และสมบัติการเรืองแสงของ CQDs ได้ดีกว่า ผ่านการเลือกชนิดของสารตั้งต้นและการปรับสภาวะปฏิกิริยา จึงเหมาะกับการผลิต CQDs ที่ต้องการสมบัติเฉพาะสำหรับการใช้งานขั้นสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น วัตถุดิบบางชนิดอาจมีต้นทุนสูง สารตั้งต้นบางประเภทอาจมีความเป็นพิษ และในบางกรณีอาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูงเท่าที่ต้องการ

ที่มาของข้อมูล

1. Xue, H., Yang, J., Yu, H., Dong, R., Liao, X., Tan, J. (2026), The carbon quantum dots: Preparation, antibacterial mechanisms, and application in food packaging. *Current Research in Food Science*, 12: e101316. (<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2026.101316>)
2. 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>)