

ไฮโดรเจลและการประยุกต์ใช้ในงานด้านอาหาร Hydrogels and Their Applications in Foods

ชลิดา เนียมน้ย^๑ และ สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา^{๒,๓}

^๑ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^๒ราชบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร ประเพณีวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา

^๓ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
sakamon.dev@kmutt.ac.th

บทนำ

ไฮโดรเจล (hydrogel) คือวัสดุอ่อนนุ่ม (soft material) ที่ประกอบด้วยโครงข่าย ๓ มิติของพอลิเมอร์ กักเก็บน้ำได้มาก โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการเชื่อมขวางสายพอลิเมอร์ด้วยอันตรกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้วัสดุมีสมบัติเป็นทั้งของแข็งและของเหลวในเวลาเดียวกัน ไฮโดรเจลมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น สามารถดูดซับและบวมน้ำ และสามารถคืนตัวหลังรับแรง (elastic recovery) ซึ่งส่งผลต่อความยืดหยุ่น รวมถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ด้วยเหตุนี้ จึงมีผู้นำไฮโดรเจลไปใช้งานหลากหลาย เช่น ในงานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) การดูดซับสารพิษ การนำส่งและควบคุมการปลดปล่อยยา การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยืดหยุ่น วัสดุทางการแพทย์ รวมถึงในงานด้านอาหาร ซึ่งมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพอาหาร การควบคุมเนื้อสัมผัส การนำส่งสารอาหาร และการคงเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

โครงสร้างไฮโดรเจล

หลักการสำคัญของการออกแบบไฮโดรเจลคือแนวคิด “โครงสร้างกำหนดหน้าที่” (structure determines function) ซึ่งหมายถึง การปรับแต่งชนิดของพอลิเมอร์และรูปแบบการเชื่อมขวางให้สามารถควบคุมสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น และใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ เช่น ไฮโดรเจลที่มีพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากจะมีความยืดหยุ่นสูง ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) จะมีความแข็งแรงและทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดี ทั้งนี้ เราสามารถออกแบบไฮโดรเจลได้หลายขนาดและรูปแบบ ตั้งแต่ระดับนาโนเมตรจนถึงเซนติเมตร ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ไมโครเจล

ไมโครเจล (microgel) มีขนาด ๑๐๐ นาโนเมตร ถึง ๑๐ ไมโครเมตร ปรากฏอยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ที่บวมตัวในน้ำ สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (emulsion polymerization) ใช้ในระบบนำส่งยา หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะสำคัญของไมโครเจลคือความสามารถในการปรับรูปร่างและสมบัติให้ไวต่อสิ่งเร้า เช่น อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นาโนเจล

นาโนเจล (nanogel) มีขนาดเล็กกว่า ๑๐๐ นาโนเมตร สามารถซึมผ่านเยื่อเซลล์ได้ มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเป็นค่าสูง จึงเหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ เช่น การนำส่งยาแบบแม่นยำ การป้องกันการสลายของสารชีวโมเลกุล ตัวอย่างเช่น นาโนเจลจากไคโทซาน-เดกซ์ทราน (chitosan-dextran) ที่ใช้ห่อหุ้มโปรตีนหรือพอลิเพปไทด์เพื่อป้องกันการเสื่อมสลายขณะผ่านระบบทางเดินอาหาร

ไฮโดรเจลแบบชั้นเปลือกแกน

ไฮโดรเจลแบบชั้นเปลือกแกน (core-shell structured hydrogel) มีแกนใน (core) และเปลือกนอก (shell) โดยที่เปลือกนอกมีสมบัติไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช เช่น การพองตัว การละลาย ขณะที่แกนในยึดเกาะกับเนื้อเยื่อชีวภาพ เช่น ผิวเยื่อบุ กระเพาะ ลำไส้ ผิวแผล ได้ดี จึงมีประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์ภายในร่างกาย เหมาะกับการปลดปล่อยสารอาหารหรือยาแบบควบคุมทิศทาง

ไฮโดรเจลหลายชั้น

ไฮโดรเจลหลายชั้น (multi-layered hydrogel) ประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ซ้อนกันหลายชั้น (onion-like layers) หรือมีโครงสร้างสองหน้า (Janus structure) แต่ละชั้นอาจมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น ด้านหนึ่งดูดซับน้ำ ด้านหนึ่งกันน้ำ จึงอาจใช้ควบคุมการปลดปล่อยสารอาหาร ๒ ชนิดที่ไม่เข้ากัน

ไฮโดรเจลพรุน

ไฮโดรเจลพรุน (porous hydrogel) มีความพรุนในเนื้อเจลที่อาจใช้เร่งการซึมผ่านของน้ำและสารละลาย การสร้างรูพรุนทำได้โดยการอบแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) การเกิดโฟมแก๊ส (gas foaming) หรือการแยกชั้นของสาร (phase separation) เหมาะสำหรับระบบส่งสารอาหารหรือเอนไซม์ในอาหาร

ไฮบริดไฮโดรเจล

ไฮบริดไฮโดรเจล (hybrid hydrogel) เป็นผลจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ หรือผสมกับอนุภาคนาโน เช่น ซิลิกา อนุภาคดินเหนียวนาโน กราฟีน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติพิเศษอื่น ๆ เช่น สภานำไฟฟ้า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

การประยุกต์ในงานด้านอาหาร

แม้ไฮโดรเจลจะมีจุดเริ่มต้นจากงานด้านชีวการแพทย์ แต่ในทศวรรษที่ผ่านมาผู้นำไฮโดรเจลมาใช้ในงานด้านอาหารอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในด้านต่าง ๆ ดังนี้

การใช้งานด้านโภชนาการและสุขภาพ

ไฮโดรเจลสามารถใช้เป็นตัวห่อหุ้มสารอาหารที่ไวต่อสภาวะแวดล้อม เช่น วิตามิน โปรตีน สารเสริมชีวณะ (probiotics) กรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยมีข้อดี คือ ป้องกันการสลายด้วยสาเหตุจากออกซิเจน แสง หรือค่าพีเอช และสามารถปลดปล่อยสารออกฤทธิ์อย่างควบคุมในระบบทางเดินอาหาร พอลิเมอร์ที่ใช้ในการสร้าง

ไฮโดรเจลมักเป็นชนิดที่ย่อยได้ในระบบทางเดินอาหาร เช่น แอลจินेट เพกทิน ไคโทซาน เวย์โปรตีน และ เจลาติน

โครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลสามารถใช้ในการดักจับหรือลดการดูดซึมไขมันและคาร์โบไฮเดรต อีกทั้งยังขยายตัวได้ในกระเพาะอาหาร ช่วยเพิ่มความรู้สึกอิ่ม ทำให้ลดปริมาณการบริโภคอาหาร ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลประเภทนี้ได้แก่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และคอนยัค กุลโคแมนแนน

ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจล ผลิตภัณฑ์นม ขนมหวาน อาจใช้ไฮโดรเจลปรับเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยให้ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลหรือสารทดแทนไขมัน เช่น เพกทินและคาราจีแนน ซึ่งใช้สร้างเจลเนียนนุ่มในโยเกิร์ต แขนแทนกัม และโลคัสพีนกัม (locust bean gum) ซึ่งใช้เพิ่มความหนืดในไอศกรีม

การใช้ในกระบวนการแยกสารและฟอกสี

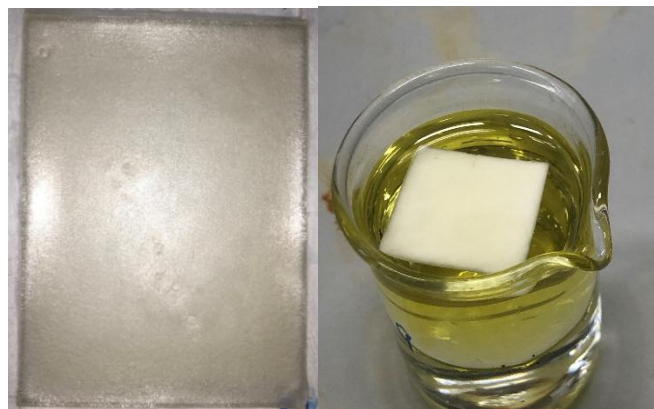
ไฮโดรเจลที่มีหมู่ประจุสามารถดูดซับโลหะหนักหรือสารปนเปื้อน เช่น Pb^{2+} , Cu^{2+} สีย้อมอาหาร ได้ ตัวอย่างเช่นไฮโดรเจลไคโทซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งใช้ดูดซับโลหะหนักในน้ำผลไม้ และไฮโดรเจลพอลิอะคริลาไมด์-ดินเหนียว (clay) ซึ่งใช้กรองโปรตีนในกระบวนการผลิตเวย์โปรตีน

บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

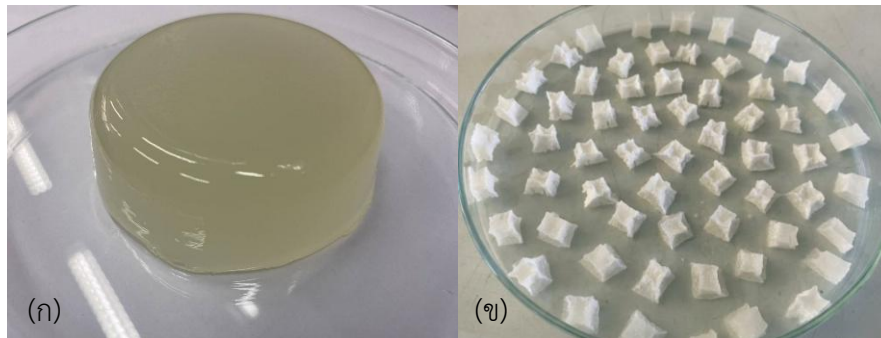
ไฮโดรเจลสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ชีวภาพ (biosensor) ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช แก๊ส หรือสารระเหยในอาหาร โดยอาจใช้งานในลักษณะฟิล์มห่ออาหาร เช่น ไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์-แอนโทไซยานินที่จะเปลี่ยนสีเมื่ออาหารเน่าเสีย ไฮโดรเจลไคโทซาน-สังกะสีออกไซด์ที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและยืดอายุการเก็บอาหาร

ตัวดูดซับความชื้น แก๊ส น้ำมัน และสารพิษ

ไฮโดรเจลบางชนิด เช่น ไฮโดรเจลซิลิกา-พอลิอะคริลิกแอซิด ใช้ดูดซับความชื้นในบรรจุภัณฑ์ผลไม้สด ไฮโดรเจลสตาร์ช-ไคโทซานใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และรักษาความสด ไฮโดรเจลเซลลูโลส-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ใช้ดูดซับน้ำมันทอด (ภาพที่ ๑) และสารกำจัดศัตรูพืช (ภาพที่ ๒)



ภาพที่ ๑ แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเซลลูโลส-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการดูดซับน้ำมันทอด



ภาพที่ ๒ ไฮโดรเจลเซลลูโลส-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช
(ก) ก่อน (ข) หลัง การอบแห้งแบบแช่แข็ง

การใช้ในกระบวนการตรวจสอบความปลอดภัย

ไฮโดรเจลสามารถฝังเอนไซม์หรือสารบ่งชี้ (indicator) ไว้ในตัว จึงสามารถใช้ตรวจสอบหาสารพิษตกค้างได้ เช่น การตรวจโลหะหนักด้วยไฮโดรเจลสารประกอบระดับนาโนที่เปลี่ยนสีเมื่อจับกับไอออนโลหะ

แนวโน้มในอนาคตของการใช้ไฮโดรเจลในงานด้านอาหาร

เทคโนโลยีไฮโดรเจลในงานด้านอาหารกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็วจากการบูรณาการความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ ชีวเคมี และวิศวกรรมอาหาร เราอาจจำแนกแนวโน้มในอนาคตเป็นทิศทางหลักต่าง ๆ ดังนี้

ไฮโดรเจลตอบสนองต่อสิ่งเร้า

ไฮโดรเจลตอบสนองต่อสิ่งเร้า (stimuli-responsive hydrogel) ออกแบบให้ตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก เช่น อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช แสง สนามแม่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจลจากพอลิไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะจากเจลเป็นของเหลวได้เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ใช้ควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารในร่างกาย ไฮโดรเจลตอบสนองต่อค่าพีเอช ซึ่งใช้ในระบบปลดปล่อยสารอาหารแบบเจาะจงตำแหน่งในทางเดินอาหาร และไฮโดรเจลตอบสนองต่อแสงหรือสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้ในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถตรวจจับความสดของอาหารผ่านการเปลี่ยนสีหรือสัญญาณแม่เหล็ก

ไฮโดรเจลสำหรับการประยุกต์ในอาหารเฉพาะกลุ่ม

การประยุกต์ไฮโดรเจลในอนาคตจะเน้นการตอบสนองความต้องการเฉพาะบุคคล เช่น อาหารสำหรับผู้สูงอายุที่ต้องมีเนื้อสัมผัสนุ่มและย่อยง่าย อาหารที่ทำหน้าที่นำส่งสารเสริมชีวิต วิตามิน หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างตรงจุด อาหารสำหรับผู้ป่วย (ได้แก่ อาหารโปรตีนสูง อาหารควบคุมระดับน้ำตาล) และอาหารสำหรับผู้ป่วยกลืนลำบากและผู้ป่วยโรคกระเพาะ

การผสมผสานเทคโนโลยีดิจิทัลและนาโนเทคโนโลยี

การพัฒนาไฮโดรเจลในงานด้านอาหารมีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การใช้ปัญญาประดิษฐ์ช่วยออกแบบโครงสร้างและสูตรของไฮโดรเจลให้เหมาะกับวัตถุดิบ การผสมผสานอนุภาคนาโน

(เช่น ซิลิกา แกรไฟต์ หรือโลหะนาโน) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น สภาพการนำไฟฟ้าหรือความสามารถในการตรวจจับสารพิษ การจำลองพฤติกรรมของไฮโดรเจลในอาหารเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในระหว่างการเก็บรักษา

บทสรุปและประเด็นความท้าทาย

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุอเนกประสงค์ที่มีโครงสร้าง ๓ มิติ และมีสมบัติพิเศษ เช่น การดูดซับน้ำ การคืนรูป การตอบสนองต่อสิ่งเร้า จึงมีบทบาทสำคัญในงานด้านอาหารสมัยใหม่ ทั้งในแง่โภชนาการ กระบวนการผลิต และบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ แนวโน้มในอนาคตจะมุ่งสู่การพัฒนาไฮโดรเจลจากแหล่งธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ ปลอดภัยและสามารถปรับสมบัติให้เหมาะสมกับความต้องการเฉพาะของผู้บริโภค โดยผสมผสานเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น นาโนเทคโนโลยี ปัญญาประดิษฐ์ ตลอดจนการพิมพ์ ๓ มิติ เพื่อสร้างอาหารที่ปลอดภัย มีคุณค่า และยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าไฮโดรเจลจะมีศักยภาพสูง แต่ยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ด้านความปลอดภัยของวัตถุดิบ ซึ่งต้องมั่นใจได้ว่าพอลิเมอร์และสารเชื่อมขวางไม่มีพิษและได้รับอนุญาตจากหน่วยงานกำกับดูแล อีกทั้งวัสดุชีวภาพบางชนิดยังมีราคาสูงและควบคุมคุณภาพได้ยาก นอกจากนี้ นักวิจัยยังต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับจุลภาคและสมบัติทางกลเพิ่มเติมเมื่อต้องการขยายขนาดการผลิต

บรรณานุกรม

- Li, J., Jia, X., & Yin, L. (2021). Hydrogel: Diversity of structures and applications in food science. *Food Rev. Int.* 37, 313–372.
- Nath, P. C., Debnath, S., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., Nayak, P. K., & Sharma, M. (2023). A comprehensive review of food hydrogels: Principles, formation mechanisms, microstructure, and its applications. *Gels*, 9, 1.
- Nourmohammadi, N., Austin, L., & Chen, D. (2023). Protein-based fat replacers: A focus on fabrication methods and fat-mimic mechanisms. *Foods*, 12, 957.
- Thongrueng, M., Sudsakorn, K., Charoenchaitrakool, M., Seubsai, A., Panchan, N., Devahastin, S., & Niamnuy, C. (2024). Synthesis and characterization of environmentally friendly β -cyclodextrin cross-linked cellulose/poly(vinyl alcohol) hydrogels for adsorption of malathion. *ACS Omega*, 9, 22635–22649.
- Yang, Z., Chen, L., McClements, D. J., Qiu, C., Li, C., Zhang, Z., Miao, M., Tian, Y., Zhu, K., & Jin, Z. (2022). Stimulus-responsive hydrogels in food science: A review. *Food Hydrocoll.*, 124, 107218.