

โครงสร้างและสมบัติ การสกัด การวิเคราะห์ การดัดแปรโครงสร้าง และการใช้ประโยชน์ ของไคตินและไคโตซาน

Structures and Properties of Chitin and Chitosan from Extraction and Characterization to Structural Modification and Applications

ณฐกมลวรรณ ศรีจันเพชร*

Nathakamolwan Srijunetch

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) E-mail: nathakamolwan@vru.ac.th

Received: April 7, 2026

Revised: May 27, 2026

Accepted: September 25, 2026

บทคัดย่อ

ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุชีวภาพ
บรรจุภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของวัตถุดิบและกระบวนการเตรียมส่งผลให้
โครงสร้างและสมบัติของวัสดุแตกต่างกัน บทความปริทัศน์เชิงบรรยายนี้ได้สังเคราะห์ความสัมพันธ์
ระหว่างโครงสร้าง การสกัด การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ การดัดแปร และการใช้ประโยชน์ของไคตินและ
ไคโตซาน โดยเปรียบเทียบกระบวนการสกัดทางชีวภาพ ทางเคมี และการใช้ตัวทำละลายทางเลือก พร้อม
อภิปรายการประเมินระดับการกำจัดหมู่เอซีทิล มวลโมลาร์ ความบริสุทธิ์ และสมบัติของวัสดุ การดัดแปร
ครอบคลุมการเชื่อมขวาง การดัดแปร และปฏิกิริยาที่หมู่เอมีนหรือหมู่ไฮดรอกซิล โดยยกตัวอย่างสถานะ
และผลเชิงปริมาณจากงานวิจัย การสังเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับการดัดแปรไม่ได้ทำให้
สมบัติทุกด้านดีขึ้นพร้อมกันเสมอไป เช่น การเพิ่มความคงรูปอาจลดการบวมตัวและการแพร่ของสาร
ดังนั้น การออกแบบวัสดุจึงต้องเลือกโครงสร้างให้เหมาะกับหน้าที่และสถานะการใช้งาน พร้อมทั้งแยก
หลักฐานระดับวัสดุออกจากประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ แนวทางพัฒนาที่สำคัญ ได้แก่ การรายงาน
คุณลักษณะที่เปรียบเทียบกันได้ การควบคุมสารตกค้างและความสม่ำเสมอระหว่างรุ่นการผลิต การ
ทดสอบในสถานะใช้งานจริง และการประเมินการใช้ทรัพยากรตลอดกระบวนการ

คำสำคัญ: ไคติน; ไคโตซาน; ระดับการกำจัดหมู่เอซีทิล; การดัดแปรโครงสร้าง

Abstract

Chitin and chitosan are polysaccharides with diverse applications in biomaterials, packaging, and environmental technologies. However, variations in their extraction and processing lead to different structures and properties. This narrative review explores the intricate relationships between their structure, extraction methods, characterization techniques, modification strategies, and ultimate applications. We compare biological and chemical extraction routes, including alternative solvents, and discuss methods for evaluating critical properties such as degree of deacetylation, molar mass, purity, and material characteristics. Modification approaches, including crosslinking, grafting, and reactions at amino or hydroxyl groups, are examined with selected experimental conditions and quantitative results. The review highlights that increased modification does not universally enhance all properties; for instance, improved structural stability may concurrently reduce swelling and molecular transport. Therefore, effective material design necessitates aligning structure with intended function and operating conditions, while also differentiating between material-level evidence and demonstrated product performance. Future advancements should prioritize comparable characterization, stringent control of residual substances, batch consistency, testing under realistic conditions, and a comprehensive assessment of resource utilization across the entire processing lifecycle.

Keywords: Chitin; Chitosan; Degree of deacetylation; Structural modification

บทนำและขอบเขตการทบทวน

ไคตินเป็นองค์ประกอบสำคัญที่พบในเปลือกกุ้งและปู โครงสร้างภายนอกของแมลง แขนปลาหมึก และผนังเซลล์ของราบางชนิด การนำวัตถุดิบเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จำเป็นต้องผ่านกระบวนการกำจัด โปรตีน แร่ธาตุ และองค์ประกอบอื่น ๆ เพื่อให้ได้คุณภาพผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ แหล่งวัตถุดิบที่แตกต่างกันส่งผลให้ไคตินมีองค์ประกอบและการจัดเรียงสายโซ่ที่ต่างกัน ดังนั้น กระบวนการสกัดจึงมีผลต่อทั้งความบริสุทธิ์และสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ (Younes & Rinaudo, 2015; Lv et al., 2023)

ไคโตซานได้จากการกำจัดหมู่อะเซทิลของไคติน ทำให้มีหมู่อะมิโนที่สามารถรับโปรตอนและเกิดปฏิกิริยาดัดแปรได้หลากหลาย ส่งผลให้สามารถนำไปพัฒนาเป็นฟิล์ม เม็ดเจล อนุภาค หรือวัสดุพูนได้ อย่างไรก็ตาม ไคติน ไคโตซาน เกลือไคโตซาน และอนุพันธ์ไคโตซานมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ดังนั้น การอธิบายคุณสมบัติ เช่น การละลาย ประจุ และฤทธิ์ทางชีวภาพ จึงจำเป็นต้องระบุชนิดของวัสดุและ

สภาวะที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจน (Ravi Kumar, 2000; Rinaudo, 2006)

บทความนี้เป็นบททบทวนเชิงบรรยายที่เชื่อมโยงโครงสร้าง การเตรียม การวิเคราะห์ และการใช้ประโยชน์ โดยใช้เอกสารพื้นฐานเพื่ออธิบายหลักการ ใช้งานวิจัยปฐมนุฏีเพื่ออธิบายสภาวะและผลการทดลอง และใช้มาตรฐานประกอบการพิจารณาวิธีวิเคราะห์ การเปรียบเทียบข้อมูลจะคำนึงถึงชนิดตัวอย่างและสภาวะทดสอบเป็นหลัก และจะไม่มีผลการประมาณผลรวมทางสถิติหรือจัดอันดับประสิทธิภาพจากค่าที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

โครงสร้างและสมบัติของไคติน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของ N-acetyl-D-glucosamine (GlcNAc) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ β -(1 $\rightarrow$ 4) แต่ละหน่วย GlcNAc มีหมู่แอซีแทมิด (-NHCOCH₃) ที่คาร์บอนตำแหน่ง 2 และหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3 และ 6 ไคตินที่พบในธรรมชาติอาจมีหน่วย glucosamine (GlcN) ปะปนอยู่ด้วย ดังนั้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ จึงควรกำหนดระดับอะเซทิเลชันของไคติน (Rinaudo, 2006)

การจัดเรียงตัวของสายโซ่ไคตินสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ α -ไคติน ซึ่งมีสายโซ่จัดเรียงตัวแบบขนานสวนทางกัน, β -ไคติน ซึ่งมีสายโซ่จัดเรียงตัวแบบขนานในทิศทางเดียวกัน และ γ -ไคติน ซึ่งมักถูกอธิบายว่าเป็นการจัดเรียงตัวแบบผสมผสาน ความแตกต่างของการจัดเรียงตัวนี้ส่งผลต่อความหนาแน่นของโครงสร้าง การบวมตัว และการเข้าถึงตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยา โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของพันธะในโครงสร้างหลัก

ไคตินไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ที่แข็งแรง และโครงสร้างผลึกที่จำกัดการแยกตัวของสายโซ่ ดังนั้น การดูดซับน้ำของวัสดุพูนจึงไม่ใช่กระบวนการละลาย ในการละลายไคติน จำเป็นต้องใช้ระบบตัวทำละลายพิเศษ เช่น *N,N*-dimethylacetamide/LiCl ซึ่งต้องมีการควบคุมการเตรียมตัวอย่างและระดับความชื้นอย่างเหมาะสม (Poirier & Charlet, 2002)

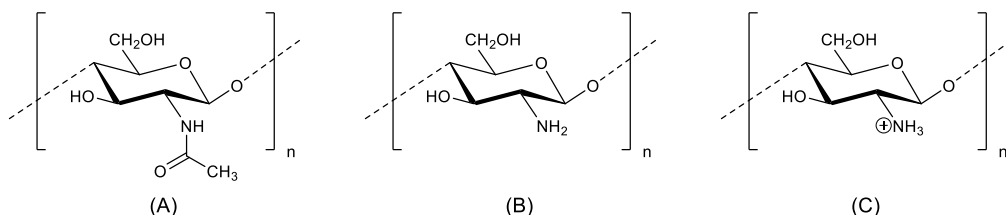
โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของไคโตซาน

ไคโตซานประกอบด้วยหน่วย GlcN และ GlcNAc ซึ่งมีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามกระบวนการเตรียม การกำจัดหมู่อะเซทิลเป็นการเปลี่ยนหมู่แอซีแทมิดที่ตำแหน่ง 2 ให้เป็นหมู่อะมิโน โดยยังคงโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ไว้ ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล (degree of deacetylation: DD) จึงเป็นตัวบ่งชี้สัดส่วนของหน่วย GlcN

โดยทั่วไป เกณฑ์ DD ประมาณร้อยละ 50 มักถูกใช้เป็นจุดแบ่งระหว่างไคตินกับไคโตซานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม การละลายของไคโตซานยังขึ้นกับการกระจายตัวของหน่วยอะเซทิลเลต มวลโมลาร์ และตัวกลางที่ใช้ ดังนั้น จึงไม่ควรกำหนดว่าไคโตซานต้องมี DD ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 จึงจะละลายได้

(Rinaudo, 2006; Younes & Rinaudo, 2015)

ในสารละลายกรด หมู่อะมิโนจะรับโปรตอนกลายเป็นหมู่อะมิเนียม ทำให้ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก เมื่อ pH เพิ่มขึ้น สัดส่วนของหมู่ที่รับโปรตอนจะลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการรวมตัวหรือตกตะกอนได้ ส่วนการใช้กรดเข้มข้นหรือการให้ความร้อนเป็นเวลานานอาจทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกไฮโดรไลซ์ ดังนั้นจึงควรแยกแยะระหว่างการละลายกับการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Rinaudo et al., 1993; Younes & Rinaudo, 2015)



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของไคติน (A) ไคโตซาน (B) และการรับโปรตอนของหมู่อะมิโน (C)

ปัจจัยกำหนดสมบัติของวัสดุ

มวลโมลาร์ การกระจายมวลโมลาร์ ระดับการจัดหมู่อะเซทิล (DD) ความเป็นผลึก และความชื้น ล้วนส่งผลต่อความหนืดและการขึ้นรูปของวัสดุ ในการเปรียบเทียบความหนืด จำเป็นต้องควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เช่น ตัวทำละลาย ความเข้มข้น ความแรงไอออนิก และอุณหภูมิ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการขยายตัวของสายโซ่ ด้วยเหตุนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการจัดหมู่อะเซทิล (DD) กับความหนืดจึงไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรงเสมอไป (Rinaudo et al., 1993)

สมบัติเชิงกลของวัสดุยังขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูป การเชื่อมขวาง สารเติมแต่ง และความชื้นด้วยเช่นกัน วัสดุที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกันอาจมีความแข็งแรงและการยึดตัวที่แตกต่างกันได้ ดังนั้น ในการรายงานผลการทดสอบ ควรระบุรูปแบบตัวอย่าง ความหนา และสภาวะการปรับสภาพก่อนการทดสอบอย่างละเอียด

การสกัดไคตินและการเตรียมไคโตซาน

การสกัดไคตินจากเปลือกสัตว์น้ำประกอบด้วยการกำจัดโปรตีน แร่ธาตุ และรงควัตถุ ส่วนการกำจัดหมู่อะเซทิลเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างไคตินให้เป็นไคโตซาน ในการรายงานกระบวนการ ควรระบุชนิดและสภาพของวัตถุดิบ วิธีการทำแห้ง ขนาดอนุภาค และฐานมวลที่ใช้คำนวณผลได้ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้อย่างเหมาะสม (Younes et al., 2012)

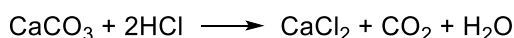
การสกัดไคตินโดยกระบวนการทางชีวภาพ

การใช้เอนไซม์โปรตีเอสอาศัยการย่อยโปรตีนที่อยู่ร่วมกับไคติน ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดและกิจกรรมของเอนไซม์ ค่า pH อุณหภูมิ อัตราส่วนเอนไซม์ต่อสารตั้งต้น และเวลา (Younes et al., 2012) ส่วนการหมักอาศัยจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์เพื่อช่วยละลายแร่ธาตุ และ/หรือ ผลิตโปรตีเอสเพื่อกำจัดโปรตีน กระบวนการนี้อาจใช้สภาวะที่ไม่รุนแรง แต่ต้องควบคุมโปรตีนตกค้าง ความสม่ำเสมอ และคุณภาพทางจุลชีววิทยา (Younes & Rinaudo, 2015)

โปรตีเอสแตกต่างจากไคติเนส โดยโปรตีเอสย่อยโปรตีน ส่วนไคติเนสย่อยสายโซ่ไคติน ดังนั้น การใช้ไคติเนสจึงเหมาะกับการผลิตโอลิโกเมอร์มากกว่าการสกัดที่ต้องการรักษามวลโมลาร์สูง

การสกัดไคตินโดยกระบวนการทางเคมี

การกำจัดแร่ธาตุทำได้โดยใช้กรดทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น



จากนั้นจึงแยกของแข็งและล้างเกลือออก โดยต้องเลือกความเข้มข้นของกรด อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว อุณหภูมิ และเวลาให้เหมาะสมกับปริมาณแร่ธาตุและการรักษามวลโมลาร์ของไคติน (Younes & Rinaudo, 2015)

สำหรับการกำจัดโปรตีน มักใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของ NaOH อาจส่งผลให้เกิดการกำจัดหมู่แอซิดและเปลี่ยนแปลงมวลโมลาร์ของไคตินได้ ส่วนการกำจัดสีอาจใช้ตัวทำละลายหรือสารออกซิไดซ์ ซึ่งจำเป็นต้องประเมินสารตกค้างและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้ การหาปริมาณเถ้าเป็นการวิเคราะห์ที่ทำลายตัวอย่าง จึงไม่ใช่ขั้นตอนในการเตรียมไคติน

ตัวทำละลายทางเลือก

ของเหลวไอออนิกและตัวทำละลายยูเทคติกเชิงลึก (deep eutectic solvents: DES) ถูกนำมาใช้ในการแยก, ละลาย หรือแปรรูปไคติน ประสิทธิภาพของกระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของตัวทำละลาย, ปริมาณน้ำ, อุณหภูมิ และวิธีการแยกพอลิเมอร์ (Lv et al., 2023) ตัวอย่างเช่น Saravana et al. (2018) รายงานการสกัดไคตินด้วยระบบ choline chloride-malonic acid ซึ่งให้ผลผลิตร้อยละ 19.41 ± 1.35 โดยมีการตรวจสอบความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค ^{13}C NMR และศึกษาการขึ้นรูปฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้นี้เป็นผลเฉพาะสำหรับวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในการทดลองนั้น ๆ

การใช้ DES หรือของเหลวไอออนิกไม่ได้หมายความว่าความยั่งยืนโดยอัตโนมัติ แต่จำเป็นต้องมีการประเมินปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น กระบวนการผลิตตัวทำละลาย, ความเป็นพิษ, การใช้น้ำและพลังงาน, ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ และคุณภาพของตัวทำละลายหลังการใช้ซ้ำ

ตารางที่ 1 ข้อควรพิจารณาในกระบวนการสกัดไคติน

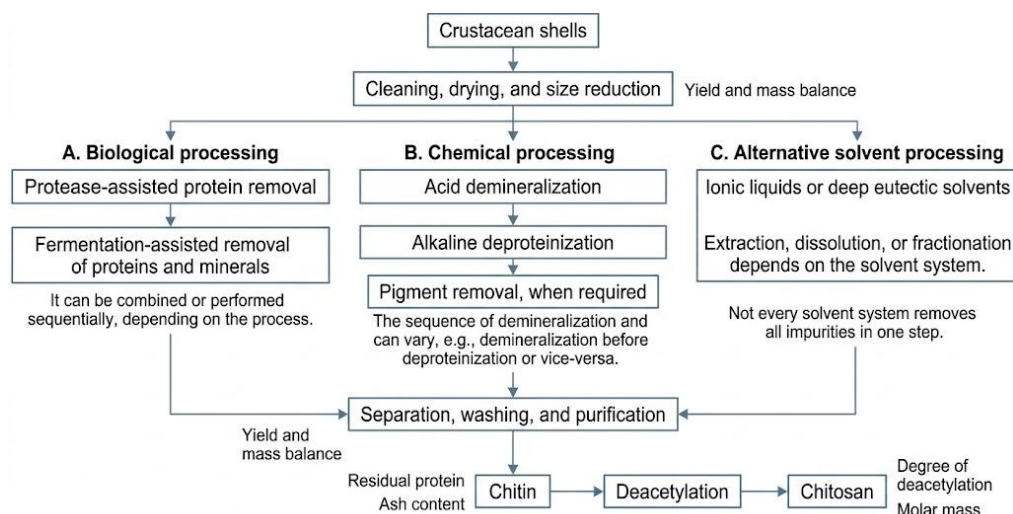
กระบวนการ	กลไกหลัก	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
กรดและเบส	ละลายแร่ธาตุและ กำจัดโปรตีน	ปรับสภาวะและขยาย ขนาดได้ง่าย	น้ำทิ้ง, สารตกค้าง, การเปลี่ยนแปลง DD หรือมวลโมลาร์
เอนไซม์	โปรตีเอส ย่อยโปรตีน	มีความจำเพาะสูงและ ใช้สภาวะอ่อนโยน	ต้นทุนสูง, โปรตีนตกค้าง, มีขั้นตอนกำจัดแร่ธาตุ
การหมัก	กรดอินทรีย์และ เอนไซม์จาก จุลินทรีย์	แยกองค์ประกอบร่วม ด้วยกระบวนการ ชีวภาพ	ใช้เวลานาน, ความไม่ สม่ำเสมอ, การควบคุม จุลินทรีย์
ของเหลวไอออนิก หรือ DES	รบกวนอันตรกิริยา และ/หรือ แยกองค์ ประกอบ	สามารถรวมการสกัด กับการขึ้นรูปในบาง สภาวะ	การนำกลับคืนยาก, สารตกค้าง, ความหนืด สูง, การใช้ทรัพยากรมาก

ที่มา: Younes et al. (2012), Younes and Rinaudo (2015), Saravana et al. (2018) และ Lv et al. (2023)

การเตรียมไคโตซานและการประเมินกระบวนการ

การเตรียมไคโตซานทางเคมีมักอาศัยการไฮโดรไลซ์หมู่แอสีเทมิโดไปเป็นหมู่อะมิโน โดยใช้เบสเข้มข้นและความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของ NaOH อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (Chang et al., 1997) การจำแนกกระบวนการว่าเป็นแบบเอกพันธ์หรือวิวิธพันธ์นั้นขึ้นอยู่กับสถานะของพอลิเมอร์ในระบบเป็นหลัก ไม่ใช่อุณหภูมิเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากการเพิ่มค่า DD (Degree of Deacetylation) อาจเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของมวลโมลาร์ จึงจำเป็นต้องประเมินผลได้ ความบริสุทธิ์ ค่า DD และการกระจายตัวของมวลโมลาร์ไปพร้อมกันในการเปรียบเทียบกระบวนการ ควรใช้วัตถุตั้งต้นและฐานมวลเริ่มต้นเดียวกัน ขณะที่การประเมินทรัพยากรควรอ้างอิงต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 2 แนวทางการสกัดไคตินและการเตรียมไคโตซาน พร้อมจุดติดตามโปรตีนตกค้าง เถ้า DD และ มวลโมลาร์ โดยลำดับขั้นตอนอาจปรับเปลี่ยนตามวัตถุดิบและสภาวะ

การวิเคราะห์ไคตินและไคโตซาน

การเลือกวิธีวิเคราะห์ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับลักษณะของตัวอย่าง เช่น เป็นพอลิเมอร์ในรูป เบส เกลือ อนุพันธ์ หรือวัสดุเชื่อมขวาง สำหรับการอ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2103, ASTM F2260 และ ASTM F2602 ควรพิจารณาขอบเขตและส่วนที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริง (ASTM International, 2025a-c)

การหามวลโมลาร์และความหนืด

มวลโมลาร์ควรรายงานในหน่วย g/mol และระบุชนิดของค่าเฉลี่ยให้ชัดเจน ได้แก่ มวลโมลาร์เฉลี่ยโดยจำนวน ($\bar{M}_n$) มวลโมลาร์เฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\bar{M}_w$) หรือมวลโมลาร์เฉลี่ยตามความหนืด ($\bar{M}_v$) ซึ่งไม่ควรใช้แทนกันโดยไม่มีคำอธิบาย

เทคนิค size-exclusion chromatography (SEC) ใช้ในการแยกสายโซ่พอลิเมอร์ตามขนาดเชิงอุทกพลศาสตร์ การสอบเทียบด้วยพอลิเมอร์ต่างชนิดอาจให้ค่าเทียบเท่าสารมาตรฐาน ในขณะที่การใช้ SEC ร่วมกับการกระเจิงแสงหลายมุมและตัวตรวจวัดความเข้มข้นจะช่วยลดการพึ่งพาการสอบเทียบดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ยังคงต้องกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสม การเตรียมตัวอย่างต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น การละลาย การรวมตัว การกรอง และอันตรกิริยากับคอลัมน์ (ASTM International, 2025c)

ความหนืดแท้จริง $[\eta]$ ได้จากการวัดสารละลายเจือจางหลายความเข้มข้นและประมาณค่าเมื่อความเข้มข้นเข้าใกล้ศูนย์ การประมาณค่า M_v สามารถทำได้โดยใช้สมการ Mark-Houwink-Sakurada:

$$[\eta] = K\bar{M}_v^a$$

โดยที่ K และ a เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับระบบพอลิเมอร์-ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และช่วงองค์ประกอบที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบก่อนนำไปใช้กับตัวอย่างที่มีค่า DD แตกต่างกัน หรือเมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลาง (Rinaudo et al., 1993) ส่วนความหนืดปรากฏที่ได้จากรีโอมิเตอร์นั้นเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับความหนืดแท้จริง และต้องมีการระบุอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดด้วย

ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิลและปริมาณหมู่อะมิโน

เมื่อกำหนดระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล (DD) และระดับอะเซทิลเลชัน (DA) เป็นเศษส่วนโมล จะได้ว่า:

$$DD = \frac{n_{GlcN}}{n_{GlcN} + n_{GlcNAc}}$$

$$DA = 1 - DD$$

หากต้องการรายงานเป็นร้อยละ ให้คูณค่าที่ได้ด้วย 100

การหา DD ด้วยเทคนิค ^1H NMR ทำได้โดยใช้อินทิกรัลสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับหน่วยอะเซทิลเลตและหน่วยน้ำตาล ซึ่งต้องใช้วิธีการเตรียมและประมวลผลที่เหมาะสม Lavertu et al. (2003) ได้รายงานวิธีที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้สำหรับโคโตซาน ในขณะที่มาตรฐาน ASTM F2260 ครอบคลุมถึงเกลียวโคโตซาน

เทคนิค FTIR สามารถใช้ประเมินค่า DA/DD ได้ หากมีสมการสอบเทียบที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับเส้นฐาน ความชื้น และวิธีการเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ความสูงพีกเดียวในการคำนวณ DD โดยไม่มีการสอบเทียบ (Brugnerotto et al., 2001)

สำหรับการไทเทรตที่สามารถแยกช่วงการสะเทินของหมู่อะมิโนได้ จำนวนโมลของหมู่อะมิโนสามารถคำนวณได้จาก

$$n_{\text{NH}_2} = C_B \Delta V$$

โดยที่ C_B คือ ความเข้มข้นโมลาร์ของเบส และ ΔV คือ ผลต่างปริมาตร ณ จุดสมมูลในหน่วยลิตร สำหรับตัวอย่างแห้งบริสุทธิ์ในรูปเบสที่ไม่มีองค์ประกอบรบกวน คำนี้อจะสัมพันธ์กับ DD ดังนี้:

$$n_{\text{NH}_2} = \frac{mDD}{161.16DD + 203.19DA}$$

เมื่อ m คือ มวลตัวอย่างในหน่วยกรัม ส่วน 161.16 และ 203.19 คือ มวลโมลาร์ของหน่วยซ้ำ GlcN และ GlcNAc ในหน่วย g/mol ตามลำดับ

การบวมตัวและการละลาย

การบวมตัวเป็นการที่วัสดุดูดซับตัวกลางโดยยังคงโครงสร้างเดิมไว้ ในขณะที่การละลายคือการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในระดับโมเลกุล อัตราส่วนการบวมตัวสามารถคำนวณจากมวลแห้งเริ่มต้นได้ดังนี้:

$$Q = \frac{m_s - m_d}{m_d}$$

โดยที่ m_s คือ มวลของวัสดุหลังการบวมตัวและกำจัดของเหลวบนพื้นผิว และ m_d คือ มวลแห้งเริ่มต้นของวัสดุ ค่า Q จะรายงานเป็น g/g หรืออาจคูณด้วย 100 เพื่อแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ในการประเมินการละลายโดยใช้มวลส่วนตักข้าง ควรพิจารณาถึงการสูญเสียตัวอย่างและการชะออกขององค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย และต้องระบุ pH, อุณหภูมิ, ความแรงไอออนิก, ระยะเวลา และอัตราส่วนของตัวอย่างต่อตัวกลางให้ชัดเจน

การสูญเสียน้ำหนักเมื่อทำให้แห้งอาจไม่ได้หมายถึงปริมาณน้ำทั้งหมดเสมอไป เนื่องจากอาจมีสารระเหยอื่น ๆ ปะปนอยู่ ส่วนปริมาณเหล่านี้สำหรับการประเมินองค์ประกอบอินทรีย์ที่ตักข้าง แต่ไม่สามารถยืนยันชนิดของแร่ธาตุหรือการไม่มีโปรตีนตักข้างได้

โครงสร้าง พื้นผิว และสมบัติวัสดุ

เทคนิค FTIR และ NMR ใช้สำหรับตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมี ส่วน XRD ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ สำหรับ SEM และ TEM ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัณฐานวิทยาของพื้นผิว แต่ไม่สามารถยืนยันชนิดของพันธะเคมีได้ ในขณะที่ EDS และ XPS ให้ข้อมูลองค์ประกอบธาตุ ซึ่งควรนำมาพิจารณาร่วมกับหลักฐานโครงสร้างอื่น ๆ เช่น หากตรวจพบฟอสฟอรัส ควรมีการวิเคราะห์ด้วย ^{31}P NMR และมีการกำจัดฟอสเฟตอิสระ (Suchyta et al., 2017) ในการวิเคราะห์ด้วย TGA และ DSC จำเป็นต้องระบุบรรยากาศ อัตราการให้ความร้อน และประวัติของตัวอย่างอย่างละเอียด

การหาพื้นที่ผิวด้วยวิธีการดูดซับแก๊ส (BET) ต้องมีการเลือกช่วงข้อมูลและการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสม (Thommes et al., 2015) ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากวัสดุแห้งอาจไม่สะท้อนถึงพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้เมื่อวัสดุบวมตัว สำหรับค่าศักย์ซิตา ต้องรายงานพร้อมกับ pH ของตัวกลาง ความเข้มข้น และชนิดของเกลือ เนื่องจากประจุที่วัดได้ขึ้นอยู่กับสถานะเหล่านี้ (Mao et al., 2001; Gutiérrez-Ruiz et al., 2024)

ในการทดสอบแรงดึง ควรระบุขนาดของชิ้นทดสอบ ความเร็วในการทดสอบ และสถานะการปรับสภาพให้ชัดเจน มาตรฐาน ASTM D882 เหมาะสำหรับแผ่นพลาสติกบาง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาความเหมาะสมก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุโคโตนาน (ASTM International, 2026) วัสดุที่ออกแบบมาสำหรับ

การใช้งานในสภาพเปียก ควรได้รับการทดสอบในสภาวะที่เปียกขึ้นด้วย

ระดับการแทนที่ (degree of substitution: DS) ต้องระบุฐานการคำนวณและตำแหน่งที่เกิดการแทนที่ (N หรือ O) การพบหมู่ฟังก์ชันหรือธาตุใหม่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะยืนยันการดัดแปรได้ จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดการอิสระและใช้หลักฐานจากหลายวิธีประกอบกัน

การเตรียมอนุพันธ์และการดัดแปรโครงสร้าง

การเกิดเจล การเชื่อมขวาง และการตอ้ง

การเกิดเจลแบบไอออนิกเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่เอมีโนที่รับโปรตอนกับสารประจุลบ เช่น sodium tripolyphosphate (TPP) โดยที่อัตราส่วนของสาร, pH และวิธีการผสมล้วนส่งผลต่อขนาดและความคงตัวของอนุภาค อย่างไรก็ตาม อันตรกิริยานี้ไม่ได้เป็นหลักฐานที่บ่งชี้ถึงการเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่าง TPP กับไคโตซาน (Gutiérrez-Ruiz et al., 2024)

สำหรับการเชื่อมขวางแบบโควาเลนต์ มักใช้สาร เช่น glutaraldehyde หรือ genipin เพื่อสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ ซึ่งช่วยเพิ่มความคงรูป แต่จำเป็นต้องประเมินปริมาณหมู่เอมีโนที่ยังคงเหลืออยู่ การบวมตัวของวัสดุ และสารตกค้างที่อาจเกิดขึ้น (Thambiliyagodage et al., 2023) ในส่วนของการตอ้ง คือการเชื่อมสายโซ่ด้านข้างเข้ากับโครงสร้างไคโตซาน เช่น chitosan-g-poly(acrylic acid) ซึ่งต้องมีการแยกพอลิเมอร์อิสระออกก่อน เพื่อยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้น (Liu et al., 2007)

ปฏิกิริยาที่ตำแหน่งไนโตรเจนและออกซิเจน

ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ การรับโปรตอน, การป้องกันหมู่ฟังก์ชัน, ความเป็นนิวคลีโอไฟล์, ชนิดของรีเอเจนต์ และตัวทำละลาย ดังนั้น การยืนยันตำแหน่งการแทนที่ที่หมู่เอมีโน C2 หรือหมู่ไฮดรอกซิล C3/C6 จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้ข้อมูลโครงสร้างประกอบ

N-alkylation เป็นการเพิ่มหมู่แอลคิลที่ตำแหน่งไนโตรเจน โดยวิธี reductive amination จะเริ่มต้นจากการเกิด imine/iminium จากสารคาร์บอนิล ตามด้วยการรีดิวซ์เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ N-alkyl ดังนั้น การเกิด Schiff base เพียงขั้นเดียวจึงยังไม่ให้เอมีนทุติยภูมิ Kurita และ Isogai (2010) ใช้โซเดียมหรือกรดลิทูลินิก ร่วมกับ NaBH_3CN ในน้ำ โดยพบว่าสารคาร์บอนิลที่แตกต่างกันให้ผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน และผลต่อการละลายขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนของหมู่ที่นำเข้าไป

N-acylation เป็นการสร้างพันธะเอไมด์ที่หมู่เอมีโน ซึ่งส่งผลให้จำนวนหมู่เอมีโนอิสระลดลง การใช้ cyclic anhydride อาจทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ Tzereme et al. (2019) ได้ศึกษาการดัดแปรด้วยแอนไฮไดรด์เพื่อใช้ในการดูดซับไดโกลฟีแนค การยืนยันปฏิกิริยานี้ต้องแยกเอไมด์ที่เกิดขึ้นใหม่จากเอไมด์เดิม และพิจารณา O-acylation ที่อาจเกิดขึ้นร่วมด้วย

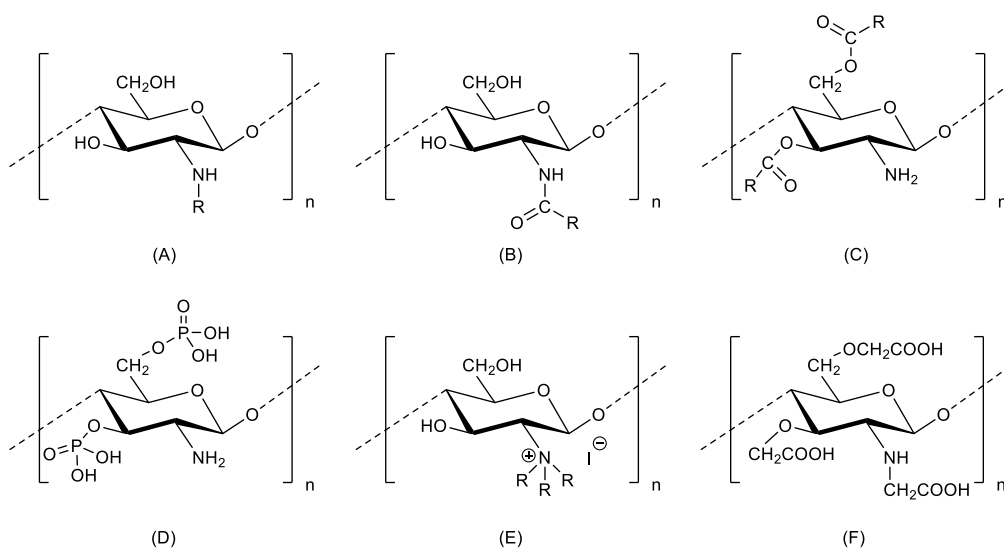
O-acylation เป็นการสร้างพันธะเอสเทอร์ที่หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งต้องควบคุมปฏิกิริยาของหมู่เอมีโน หากต้องการความจำเพาะ Zhang et al. (2017) ได้ดัดแปรเส้นใยนาโนไคโตซานหลังการปั่นด้วยไฟฟ้า

สกลิต โดยใช้แอนไฮไดรด์ของกรดไขมันร่วมกับไพริดีน พบว่าผลต่อการเปียกน้ำและโครงสร้างเส้นใยขึ้นอยู่กับความยาวของหมู่เอซิล ดังนั้น การเพิ่มความคงตัวในสภาพชื้นจึงไม่ควรตีความว่าเป็นการเพิ่มการละลายน้ำ

Phosphorylation เป็นการเพิ่มหมู่ฟอสเฟต โดยตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับบริเวณและสภาวะ ฟอสเฟตเอสเทอร์มีพันธะ P-O-C ซึ่งแตกต่างจากฟอสโฟเนตที่มีพันธะ P-C Suchyta et al. (2017) ใช้ POCl_3 ในกรดมีเทนซัลโฟนิก และยืนยันโครงสร้างด้วย ^{31}P NMR ร่วมกับ XPS การตรวจหาเพียงฟอสฟอรัสอย่างเดียวไม่สามารถแยกฟอสเฟตอิสระออกจากหมู่ที่เชื่อมกับพอลิเมอร์ได้

Quaternization เป็นการสร้างหมู่แอมโมเนียมควอเทอร์นารีที่มีประจุบวกถาวร เช่น *N,N,N*-trimethylated sites แต่สมบัติโดยรวมยังคงขึ้นอยู่กับระดับการแทนที่ หมู่ที่เหลืออยู่ และไอออนคู่ประจุ Sieval et al. (1998) รายงานการเตรียม *N*-trimethyl chitosan chloride โดยติดตามการแทนที่ด้วย NMR ทั้งนี้ ระดับ quaternization เป็นค่าที่แตกต่างจาก DD

Carboxymethylation เป็นการเพิ่มหมู่ $-\text{CH}_2\text{COOH}$ ที่ตำแหน่ง *N* และ/หรือ *O* ดังนั้น จึงจำเป็นต้องยืนยันตำแหน่งก่อนระบุชื่ออนุพันธ์ An et al. (2009) ได้เตรียม *N*-carboxymethylchitosan โดยใช้ monochloroacetic acid ที่ pH 8 และอุณหภูมิ 90 °C โดยพบว่าอัตราส่วนของสารตั้งต้นมีผลต่อการแทนที่หนึ่งหรือสองครั้งที่ไนโตรเจน และได้ศึกษาความสามารถในการจับ Cu(II)



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาดัดแปรไคโตซาน ได้แก่ (A) N-alkylation (B) N-acylation (C) O-acylation (D) phosphorylation (E) quaternization และ (F) carboxymethylation

ตัวอย่างผลเชิงปริมาณและการเลือกวิธีดัดแปร

สภาวะและผลลัพธ์จากงานวิจัยที่เชื่อมโยงการเตรียมไคโตซานดัดแปรกับสมบัติต่าง ๆ (แสดงดัง

ตารางที่ 2) โดยตารางนี้ไม่ควรใช้เพื่อจัดอันดับประสิทธิภาพข้ามงานวิจัย เนื่องจากตัวอย่างและตัวชี้วัดที่ใช้มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) และขนาดระดับนาโนที่ต้องพิจารณาตามนิยามที่แต่ละงานวิจัยกำหนดไว้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสภาวะและผลเชิงปริมาณของไคโตซานดัดแปรและวัสดุเชิงซ้อน

วิธี	สภาวะ	ผลและขอบเขตการตีความ
Reductive N-alkylation	pH เริ่มต้น 4.5–5.0; อัตราส่วนโมล หมู่อะมิโน:NaBH ₃ CN: สารคาร์บอนิล = 1:10:3; อุณหภูมิห้อง 72 ชั่วโมง	สัดส่วนหมู่อะมิโนที่เกิดปฏิกิริยา ประมาณ 100% สำหรับ <i>N</i> -isopropyl และ 41% สำหรับ ผลิตภัณฑ์ 5-methyl- pyrrolidinone เป็นการเปลี่ยน หมู่ตามนิยามของงานวิจัย ไม่ใช่ ผลได้เชิงมวล
<i>N</i> -carboxymethylchitosan	สังเคราะห์ที่ pH 8 และ 90 °C; ทดสอบ Cu(II) ที่ pH 6.5 และ 30 °C นาน 60-90 นาที	ตัวอย่างที่รายงาน DS ของ <i>N</i> -mono 0.16 และ <i>N,N</i> -di 0.81 ให้ความจุสูงสุด 192 mg Cu(II)/g ต้องคณนิยาม DS ของงานวิจัย และ ไม่ถ่ายโอนค่าไปยังน้ำเสียจริง โดยตรง
เส้นใย O-acylated chitosan	ดัดแปรหลัง electro- spinning ด้วย fatty acid anhydrides และ pyridine นาน 2 ชั่วโมง	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยทั่วไป ประมาณ 100 nm และเส้นใย lauroylated ประมาณ 200 nm เป็นขนาดเส้นใย ไม่ใช่ขนาดสายโซ่
อนุภาคไคโตซาน-DNA	อัตราส่วน N/P 3-8; ไคโตซาน 100 µg/mL; เตรียมด้วย complex coacervation	ขนาดประมาณ 100-250 nm; ศักย์ซีตา +12 ถึง +18 mV เมื่อ pH ต่ำกว่า 6 และใกล้เป็น กลางที่ pH 7.2 เป็นสมบัติของวัสดุ เชิงซ้อนในตัวกลางที่ศึกษา

ที่มา: Kurita and Isogai (2010), An et al. (2009), Zhang et al. (2017) และ Mao et al. (2001)

การเลือกวิธีดัดแปรไคโตซานควรเริ่มต้นจากการพิจารณาหน้าที่ของวัสดุที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มหมู่ไม่ชอบน้ำอาจช่วยเพิ่มความคงตัวแต่กลับลดการเปียกน้ำ การใช้หมู่อะมิโนเพื่อสร้างพันธะใหม่ อาจลดจำนวนตำแหน่งที่สามารถรับโปรตอนได้ ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายอาจส่งผลให้

การบวมตัวและการแพร่ของสารลดลง ดังนั้น การพิจารณาเพียงค่า DS ที่เพิ่มขึ้นหรือความคงรูปเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอที่จะยืนยันความเหมาะสมต่อการใช้งาน แต่ต้องพิจารณาพร้อมกับความสามารถในการเข้าถึงตำแหน่งจับสาร การปลดปล่อยสาร และสมบัติโดยรวมของวัสดุ (Ravi Kumar, 2000)

การนำไคตินและไคโตซานไปใช้ประโยชน์

วัสดุจากไคตินและวัสดุปิดแผล

ไคตินสามารถพัฒนาเป็นเส้นใย พิล์ม และวัสดุพูนได้ Saravana et al. (2018) ได้แสดงการสกัดไคตินด้วย DES และการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ในขณะที่ Hiranpattanakul et al. (2018) ศึกษาวัสดุปิดแผลไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำจากไคตินร่วมกับไมโครปิดไคโตซาน โดยได้ประเมินคุณสมบัติการดูดซับน้ำ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย และความเข้ากันได้กับเซลล์ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้เป็นของวัสดุผสมตามสูตรที่ศึกษา ไม่ใช่สมบัติของไคตินเพียงชนิดเดียว

การประเมินวัสดุปิดแผลควรพิจารณาปัจจัยหลายประการร่วมกัน ได้แก่ การดูดซับของเหลว ความคงรูป การแลกเปลี่ยนไอออน และการตอบสนองของเซลล์ ส่วนฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของไคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับมวลโมลาร์ ชนิดของจุลินทรีย์ ค่า pH และตัวกลาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีชุดควบคุมผลของกรด (No et al., 2002) นอกจากนี้ ผลการทดลองในระดับวัสดุหรือในหลอดทดลองยังไม่สามารถยืนยันประสิทธิภาพในการรักษาแผลในมนุษย์ได้

การนำส่งสารออกฤทธิ์และกรณีศึกษา

หมู่เอมีโนที่รับโปรตอนในไคโตซานช่วยให้เกิดสารเชิงซ้อนกับสารประจุลบได้ เช่น DNA (Mao et al., 2001) ได้ศึกษาอนุภาคไคโตซาน-DNA และการถ่ายยีน โดยพบว่าขนาดและประจุของอนุภาคขึ้นอยู่กับอัตราส่วนขององค์ประกอบและสภาวะการเตรียม การจับสารที่แน่นขึ้นอาจเพิ่มการกักเก็บสาร แต่จำเป็นต้องประเมินความคงตัว การปลดปล่อยสาร และการตอบสนองทางชีวภาพด้วยเช่นกัน ผลการถ่ายยีนในระบบทดลองยังไม่สามารถเทียบเท่ากับประสิทธิภาพในการรักษาโรคในมนุษย์ได้

ฟิล์มและสารเคลือบสำหรับบรรจุภัณฑ์

ฟิล์มไคโตซานควรได้รับการประเมินในด้านความแข็งแรง การกักน้ำและแก๊ส ความคงตัวเมื่อสัมผัสความชื้น และปฏิกิริยากับสิ่งที่บรรจุ การดัดแปรด้วยหมู่ที่ไม่ชอบน้ำอาจเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการเปียกน้ำและความคงตัวได้ แต่ต้องทำการทดสอบกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจริง ไม่ควรสรุปจากโครงสร้างเพียงอย่างเดียว (Zhang et al., 2017; Thambiliyagodage et al., 2023) การกล่าวอ้างถึงการยืดอายุผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีผลการทดสอบภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการประเมินการเคลื่อนย้ายสารจากวัสดุบรรจุภัณฑ์ด้วย

การดูดซับไอออนและสารปนเปื้อน

หมู่อะมิโน คาร์บอกซิล และฟอสเฟตมีส่วนในการจับสารผ่านการเกิดสารเชิงซ้อน อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต หรือกลไกอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง การรายงานผลต้องระบุค่า pH ความเข้มข้นของสาร ปริมาณตัวดูดซับ เวลา และอุณหภูมิ (An et al., 2009; Tzereme et al., 2019) ความจุการดูดซับที่สมดุลคำนวณจากสูตร:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

เมื่อ C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและที่สมดุลในหน่วย mg/L, V คือ ปริมาตรสารละลายในหน่วยลิตร และ m คือมวลแห้งของตัวดูดซับในหน่วยกรัม ทำให้ q_e มีหน่วยเป็น mg/g ทั้งนี้ ต้องแยกการดูดซับออกจากการตกตะกอนหรือการสูญเสียด้วยกลไกอื่น และควรประเมินผลของไอออนร่วม การฟื้นฟูสภาพ และการชะละลายก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำจริง

วัสดุดูดซับน้ำและงานเกษตร

การต่อกิ่งพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำได้ เช่น การศึกษา chitosan-g-poly(acrylic acid)/sodium humate โดย Liu et al. (2007) อย่างไรก็ตาม การดูดซับน้ำได้สูงในน้ำบริสุทธิ์ยังไม่สามารถยืนยันประสิทธิภาพในดินได้ จำเป็นต้องประเมินการดูดซับและการปลดปล่อยน้ำในสารละลายเกลือ ความคงตัว ผลกระทบต่อพืช และชะตากรรมของวัสดุในดินก่อนที่จะสรุปความเหมาะสมทางการเกษตร

ช่องว่างความรู้และแนวทางการวิจัยต่อยอด

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสมบัติของโคตินและไคโตซานยังคงตีความได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อ DD (degree of deacetylation), มวลโมลาร์ และความเป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกัน งานวิจัยควรใช้พอลิเมอร์ตั้งต้นชุดเดียวกันและออกแบบการทดลองเพื่อแยกผลของแต่ละปัจจัย พร้อมทั้งตรวจสอบความแปรปรวนระหว่างรุ่นการผลิต

การเปรียบเทียบข้อมูลควรใช้ฐานมวล นิยามของ DD/DS และสภาวะการทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยรายงานแหล่งวัตถุดิบ รูปแบบทางเคมี วิธีการทำให้บริสุทธิ์ มวลโมลาร์ และหลักฐานตำแหน่งการแทนที่หลังการแยกสารอิสระ สำหรับมาตรฐานที่นำมาใช้ต้องระบุฉบับและขอบข่ายให้ชัดเจน

การทดสอบควรสะท้อนหน้าที่ของวัสดุนั้น ๆ เช่น วัสดุปิดแผลต้องประเมินการดูดซับของเหลว ควบคู่ไปกับความคงรูป ระบบนำส่งสารต้องประเมินการกักเก็บสารควบคู่ไปกับการปลดปล่อยสาร และตัวดูดซับต้องทดสอบผลของไอออนร่วมกับการนำกลับมาใช้ซ้ำ ส่วนการขยายขนาดการผลิตควรติดตามผลจากการผสม การถ่ายเทความร้อน การล้าง และการทำแห้ง รวมถึงปริมาณน้ำ พลังงาน ของเสีย และการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ซ้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเทียบเคียงกัน

บทสรุป

ไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างหลักที่สัมพันธ์กัน แต่ความแตกต่างของสัดส่วนหน่วย GlcNAc และ GlcN ส่งผลให้คุณสมบัติในการรับโปรตอน การละลาย และตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันไป การเลือกกระบวนการสกัดและเตรียมจึงต้องพิจารณาจากผลได้ควบคู่ไปกับความบริสุทธิ์ ค่า DD และมวลโมลาร์ สำหรับการยืนยันการดัดแปร จำเป็นต้องอาศัยหลักฐานที่แสดงชนิดของพันธะ ตำแหน่งและระดับการแทนที่ รวมถึงการตรวจสอบสารตกค้าง

การเพิ่มการดัดแปรไม่ได้ทำให้สมบัติทุกด้านดีขึ้นพร้อมกัน การออกแบบจึงควรเริ่มต้นจากหน้าที่และสถานะการใช้งาน แล้วจึงเลือกโครงสร้างที่ให้ความสมดุลระหว่างความคงรูป การบวมตัว การจับสาร และการแพร่ การทดสอบในสภาวะจริง การควบคุมความสม่ำเสมอ และการประเมินทรัพยากร เป็นขั้นตอนสำคัญในการเชื่อมโยงผลการทดลองระดับห้องปฏิบัติการกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ ข้อเสนอสรุปที่ได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตของหลักฐานที่ศึกษาเท่านั้น

คำชี้แจงการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการจัดทำบทความ

ในการจัดเตรียมบทความฉบับนี้ ผู้เขียนได้ใช้ AI เพื่อช่วยในการร่าง จัดลำดับและกระชับเนื้อหา รวมถึงปรับปรุงการใช้ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้ตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหา รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ สมการ และเอกสารอ้างอิงกับแหล่งต้นฉบับด้วยตนเอง และรับผิดชอบต่อนเนื้อหาทั้งหมดของบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- An, N. T., Thien, D. T., Dong, N. T., & Dung, P. L. (2009). Water-soluble N-carboxymethyl-chitosan derivatives: Preparation, characteristics and its application. *Carbohydrate Polymers*, 75(3), 489-497.
- ASTM International. (2026). *Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting (ASTM D882-18)*.
- ASTM International. (2025a). *Standard guide for characterization and testing of chitosan salts as starting materials intended for use in biomedical and tissue-engineered medical product applications (ASTM F2103-18(2025))*.
- ASTM International. (2025b). *Standard test method for determining degree of deacetylation in chitosan salts by proton nuclear magnetic resonance (^1H NMR)*

spectroscopy (ASTM F2260-18(2025)).

ASTM International. (2025c). *Standard test method for determining the molar mass of chitosan and chitosan salts by size exclusion chromatography with multi-angle light scattering detection (SEC-MALS) (ASTM F2602-18(2025)).*

Brugnerotto, J., Lizardi, J., Goycoolea, F. M., Argüelles-Monal, W., Desbrières, J., & Rinaudo, M. (2001). An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization. *Polymer*, 42(8), 3569-3580.

Chang, K. L. B., Tsai, G., Lee, J., & Fu, W. R. (1997). Heterogeneous *N*-deacetylation of chitin in alkaline solution. *Carbohydrate Research*, 303(3), 327-332.

Gutiérrez-Ruiz, S. C., Cortes, H., González-Torres, M., Almarhoon, Z. M., Gürer, E. S., Sharifi-Rad, J., & Leyva-Gómez, G. (2024). Optimize the parameters for the synthesis by the ionic gelation technique, purification, and freeze-drying of chitosan- sodium tripolyphosphate nanoparticles for biomedical purposes. *Journal of Biological Engineering*, 18, 12.

Hiranpattanakul, P., Jongjitpissamai, T., Aungwerojanawit, S., & Tachaboonyakiat, W. (2018). Fabrication of a chitin/ chitosan hydrocolloid wound dressing and evaluation of its bioactive properties. *Research on Chemical Intermediates*, 44(8), 4913–4928.

Kurita, Y., & Isogai, A. (2010). Reductive *N*-alkylation of chitosan with acetone and levulinic acid in aqueous media. *International Journal of Biological Macromolecules*, 47(2), 184-189.

Lavertu, M., Xia, Z., Serreqi, A. N., Berrada, M., Rodrigues, A., Wang, D., Buschmann, M. D., & Gupta, A. (2003). A validated ¹H NMR method for the determination of the degree of deacetylation of chitosan. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 32(6), 1149-1158.

Liu, J., Wang, Q., & Wang, A. (2007). Synthesis and characterization of chitosan-g-poly(acrylic acid)/sodium humate superabsorbent. *Carbohydrate Polymers*, 70(2), 166-173.

Lv, J., Lv, X., Ma, M., Oh, D. H., Jiang, Z., & Fu, X. (2023). Chitin and chitin-based biomaterials: A review of advances in processing and food applications. *Carbohydrate Polymers*, 299, 120142.

Mao, H. Q., Roy, K., Troung-Le, V. L., Janes, K. A., Lin, K. Y., Wang, Y., August, J. T., & Leong, K. W. (2001). Chitosan-DNA nanoparticles as gene carriers: Synthesis, characterization and transfection efficiency. *Journal of Controlled Release*, 70(3), 399-421.

- No, H. K., Park, N. Y., Lee, S. H., & Meyers, S. P. (2002). Antibacterial activity of chitosans and chitosan oligomers with different molecular weights. *International Journal of Food Microbiology*, 74(1-2), 65-72.
- Poirier, M. , & Charlet, G. (2002) . Chitin fractionation and characterization in *N,N*-dimethylacetamide/lithium chloride solvent system. *Carbohydrate Polymers*, 50(4), 363-370.
- Ravi Kumar, M. N. V. (2000). A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers*, 46(1), 1-27.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632.
- Rinaudo, M., Milas, M., & Dung, P. L. (1993). Characterization of chitosan. Influence of ionic strength and degree of acetylation on chain expansion. *International Journal of Biological Macromolecules*, 15(5), 281-285.
- Saravana, P. S., Ho, T. C., Chae, S. J., Cho, Y. J., Park, J. S., Lee, H. J., & Chun, B. S. (2018). Deep eutectic solvent- based extraction and fabrication of chitin films from crustacean waste. *Carbohydrate Polymers*, 195, 622-630.
- Sieval, A. B., Thanou, M., Kotzé, A. F., Verhoef, J. C., Brussee, J., & Junginger, H. E. (1998). Preparation and NMR characterization of highly substituted *N*-trimethyl chitosan chloride. *Carbohydrate Polymers*, 36(2-3), 157-165.
- Suchyta, D. J., Soto, R. J., & Schoenfisch, M. H. (2017). Selective monophosphorylation of chitosan via phosphorus oxychloride. *Polymer Chemistry*, 8(16), 2552-2558.
- Thambiliyagodage, C., Jayanetti, M., Mendis, A., Ekanayake, G., Liyanaarachchi, H., & Vigneswaran, S. (2023). Recent advances in chitosan-based applications-A review. *Materials*, 16(5), 2073.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069.
- Tzereme, A., Christodoulou, E., Kyzas, G. Z., Kostoglou, M., Bikiaris, D. N., & Lambropoulou, D. A. (2019). Chitosan grafted adsorbents for diclofenac pharmaceutical compound removal from single-component aqueous solutions and mixtures. *Polymers*, 11(3), 497.

- Younes, I., & Rinaudo, M. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine Drugs*, 13(3), 1133-1174.
- Younes, I., Ghorbel-Bellaaj, O., Nasri, R., Chaabouni, M., Rinaudo, M., & Nasri, M. (2012). Chitin and chitosan preparation from shrimp shells using optimized enzymatic deproteinization. *Process Biochemistry*, 47(12), 2032-2039.
- Zhang, Z., Jin, F., Wu, Z., Jin, J., Li, F., Wang, Y., Wang, Z., Tang, S., Wu, C., & Wang, Y. (2017). O-acylation of chitosan nanofibers by short-chain and long-chain fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 177, 203-209.