

สารเคลือบชีวภาพและไขคาร์นูบา: แนวทางเพิ่มสมบัติกันของบรรจุภัณฑ์กระดาษอย่างยั่งยืน (Biopolymer and carnauba wax coatings: a sustainable approach for improving paper barrier properties)

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการปกป้องผลิตภัณฑ์ ยืดอายุการเก็บรักษา และลดการสูญเสียอาหาร ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับโลก อย่างไรก็ตามบรรจุภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ยังผลิตจากพลาสติกฐานปิโตรเลียม ส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกและปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางเลือกที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้ และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยกระดาษถือเป็นวัสดุทางเลือกที่มีศักยภาพสูง

กระดาษผลิตจากเส้นใยเซลลูโลส เป็นวัสดุฐานชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์ และสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ปัจจุบันกระดาษและกระดาษแข็งคิดเป็นประมาณร้อยละ 30 ของวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันทั่วโลก อย่างไรก็ตามการใช้กระดาษโดยปราศจากการปรับปรุงสมบัติยังมีข้อจำกัดสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากโครงสร้างของกระดาษมีรูพรุนและมีความชอบน้ำสูง จึงมีประสิทธิภาพต่ำในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน น้ำ ไขมัน และไขมัน ปัจจัยเหล่านี้อาจเร่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและทำให้อาหารเสื่อมสภาพก่อนสิ้นสุดอายุการเก็บรักษาที่กำหนดไว้

แนวคิดของสารเคลือบพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน (Polyelectrolyte Complex (PEC))

สารเคลือบพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน หรือ PEC เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาชั้นกั้นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับบรรจุภัณฑ์กระดาษ โดยเตรียมจากพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกัน เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิต จะเกิดการเชื่อมโยงข้ามทางไอออนิกระหว่างสายพอลิเมอร์ (ionic cross-links) ทำให้โครงสร้างของสารเคลือบมีความหนาแน่น (cohesive energy density) และมีปริมาตรอิสระลดลง จึงช่วยเพิ่มความคงตัวของเส้นทางการแพร่และลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ไคโตซาน (Chitosan) และเพกทิน (Pectin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากแหล่งธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้สร้างสารเคลือบ PEC ได้ โดยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม หมู่คาร์บอกซิลของเพกทินจะเปลี่ยนเป็นประจุลบและเกิดอันตรกิริยาทางไอออนิกกับหมู่เอมีโนที่มีประจุบวกของไคโตซาน ส่งผลให้เกิดโครงข่ายพอลิเมอร์ที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง สารเคลือบดังกล่าวสามารถแทรกและปิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกระดาษ จึงช่วยลดการแพร่ผ่านของออกซิเจนผ่านโครงสร้างที่มีรูพรุนของกระดาษได้

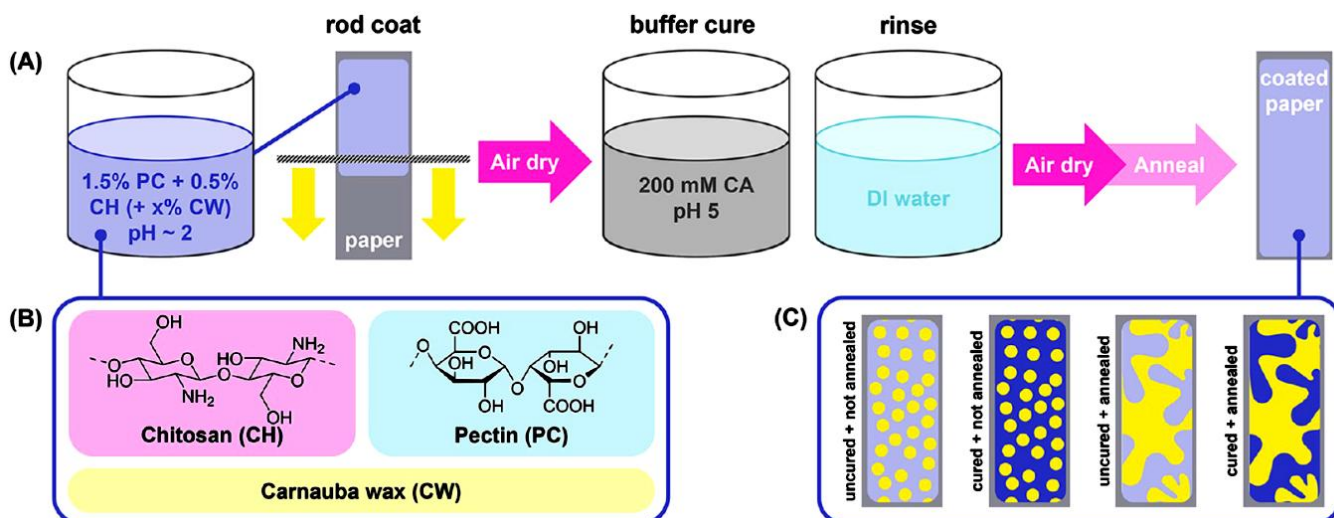
อย่างไรก็ตาม ไคโตซานและเพกทินมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดี จึงทำให้สารเคลือบ PEC มีความไวต่อความชื้นและยังมีข้อจำกัดด้านการป้องกันน้ำและไขมัน โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้องสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงหรือเก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูง

บทบาทของไขคาร์นูบาในสารเคลือบกระดาษ

เพื่อเพิ่มความทนทานต่อน้ำของสารเคลือบ PEC จึงมีการเติมไขคาร์นูบา ซึ่งเป็นไขจากแหล่งวัตถุดิบชีวภาพและมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เข้าไปในระบบสารเคลือบไคโตซานและเพกทิน ไขคาร์นูบาทำหน้าที่ลดความสามารถในการเปียกน้ำของพื้นผิว และช่วยจำกัดการซึมผ่านของน้ำและไขมันเข้าสู่โครงสร้างกระดาษ

เมื่อสารเคลือบผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของไข อนุภาคไขคาร์นูบาจะหลอมและเชื่อมต่อกันเป็นเฟสไขมันต่อเนื่องภายในสารเคลือบ โครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสพอลิอิเล็กโทรไลต์ซึ่งช่วยต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจน และเฟสไขมันที่ช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำและลดการซึมผ่านของน้ำ ขณะเดียวกันสารเคลือบยังช่วยอุดรูพรุนบนผิวกระดาษ จึงเพิ่มความต้านทานต่อการดูดซับน้ำมันและไขมัน

การผสมไคโตซาน เพกทิน และไขคาร์นูบาจึงเป็นแนวทางในการพัฒนาสารเคลือบฐานชีวภาพแบบขั้นเดียวที่ช่วยปรับปรุงสมบัติกันออกซิเจน น้ำ ไขมัน และไขมันของบรรจุภัณฑ์กระดาษ โดยยังคงแนวคิดการใช้วัสดุจากทรัพยากรหมุนเวียน และลดการพึ่งพาสารเคลือบจากพลาสติกฐานปิโตรเลียม



รูปที่ 1 (A) กระบวนการเคลือบพอลิเล็กโตรไลต์เชิงซ้อน, (B) ส่วนประกอบของสารเคลือบ และ (C) แผนผังของฟิล์มที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยบัฟเฟอร์และการอบด้วยความร้อน (ที่มา: (<https://doi.org/10.1021/acsami.5c09638>))

กระบวนการเตรียมและเคลือบสารเคลือบบนกระดาษ

1. การเตรียมสารเคลือบและการเคลือบบนกระดาษ: เริ่มจากการเตรียมสารกระจายตัวของเพกตินและไคคาร์บูนา โดยเติมอิมัลชันไคคาร์บูนาลงในสารละลายเพกตินและปรับค่า pH เป็น 2.2 จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายไคโตซานที่ปรับค่า pH เป็น 1.5 ในอัตราส่วนปริมาตรเท่ากัน และกวนให้ส่วนประกอบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

ภายใต้สภาวะกรดที่ค่า pH ประมาณ 2 หมู่คาร์บอกซิลของเพกตินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ได้รับโปรตอนและไม่มีประจุ จึงสามารถผสมรวมกับไคโตซานซึ่งมีประจุบวกได้โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นตะกอนหรือสารเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำในระหว่างการเตรียมสารเคลือบ

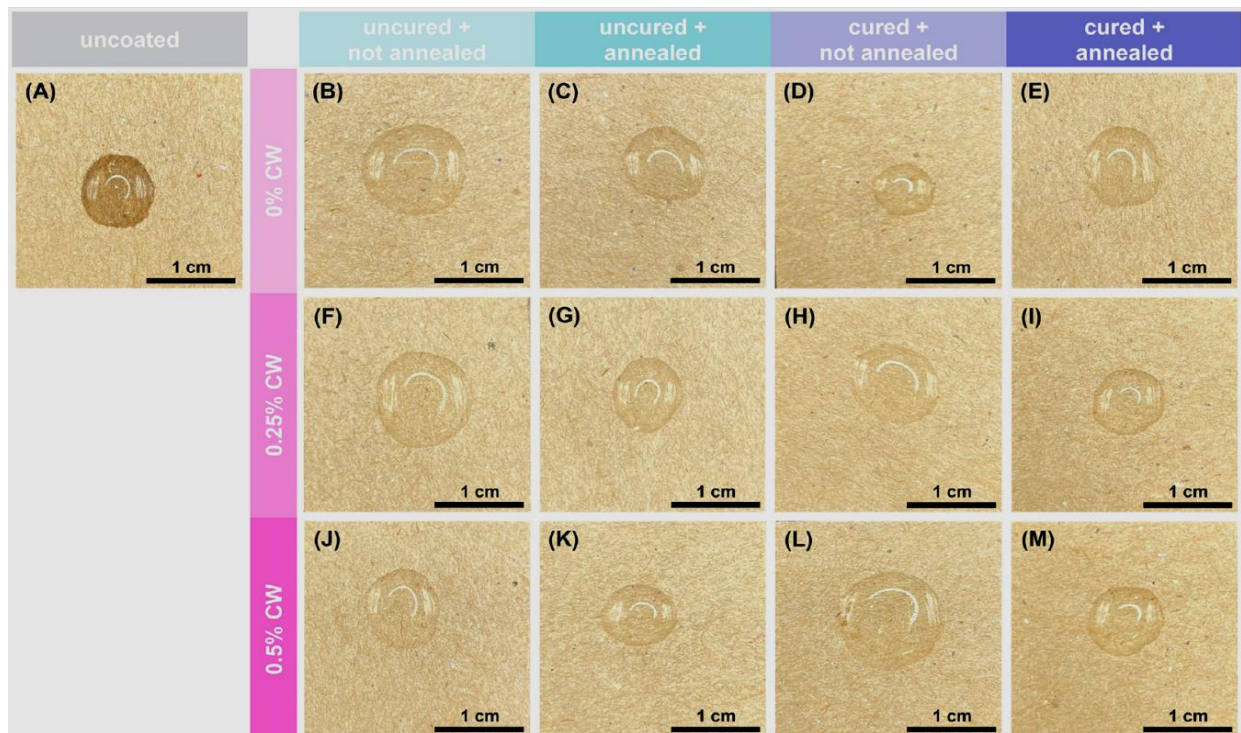
สารเคลือบที่เตรียมได้ถูกนำไปเคลือบบนผิวกระดาษด้านหนึ่งด้วยแท่งเคลือบ Mayer rod applicator เพื่อควบคุมการกระจายตัวและปริมาณสารเคลือบให้สม่ำเสมอ จากนั้นปล่อยให้กระดาษเคลือบแห้งในแนวราบที่อุณหภูมิห้อง

2. การบ่มด้วยสารละลายบัฟเฟอร์: หลังจากสารเคลือบแห้ง กระดาษเคลือบถูกนำไปจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์กรดชนิดรีดริคความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ ที่ค่า pH 5 เป็นเวลา 5 นาที การเพิ่มค่า pH จากประมาณ 2 เป็น 5 ทำให้หมู่คาร์บอกซิลของเพกตินบางส่วนสูญเสียโปรตอนและเปลี่ยนเป็นประจุลบ จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาทางไอออนิกกับหมู่เอมีนที่มีประจุบวกของไคโตซานได้

อันตรกิริยาดังกล่าวนำไปสู่การสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงข้ามทางไอออนิกภายในสารเคลือบ ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีปริมาตรอิสระลดลง จึงช่วยจำกัดการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นเคลือบ หลังการบ่ม กระดาษเคลือบถูกล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวน 3 ครั้ง เพื่อกำจัดสารตกค้าง ก่อนปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. การอบด้วยความร้อน: กระดาษที่ผ่านการเคลือบและบ่มด้วยบัฟเฟอร์ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบสูงกว่าช่วงการหลอมเหลวของไคคาร์บูนา จึงทำให้อนุภาคไขมันหลอมและเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน

ภายหลังการอบ ไคคาร์บูนาจะเกิดเป็นเฟสที่ต่อเนื่องและกระจายอยู่ภายในโครงสร้างของสารเคลือบ ขณะที่ไคโตซานและเพกตินยังคงทำหน้าที่เป็นโครงข่ายพอลิเล็กโตรไลต์ โครงสร้างสองเฟสนี้ช่วยผสานสมบัติกันออกซิเจนของพอลิเล็กโตรไลต์เชิงซ้อนเข้ากับสมบัติไม่ชอบน้ำของไคคาร์บูนา ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีความทนทานต่อน้ำและความชื้นดีขึ้น



รูปที่ 2 ภาพถ่ายของหยดน้ำมันละหุ่งบนกระดาษ: (A) กระดาษที่ไม่ได้เคลือบ, กระดาษที่เคลือบด้วย (B–E) สารเคลือบที่มี CW 0%, (F–I) สารเคลือบที่มี CW 0.25% และ (J–M) สารเคลือบที่มี CW 0.5%: (B, C, F, G, J, K) ไม่ผ่านการบ่ม และ (D, E, H, I, L, M) ผ่านการบ่มด้วยบัพเฟอร์ และ (B, D, F, H, J, L) ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และ (C, E, G, I, K, M) ผ่านการอบด้วยความร้อน ถ่ายภาพหลังจากสัมผัสกับหยดน้ำมันเป็นเวลา 15 วินาที

สมบัติกันของกระดาษเคลือบ

1. สารเคลือบพอลิเอทิลีนไกล์คอลเชิงซ้อนจากโคโคซาน เพกทิน และไซคาร์บูบา ช่วยลดการซึมผ่านของสารต่างๆ ในกระดาษ โดยให้ผลดังนี้

- ออกซิเจน: อัตราการซึมผ่านลดลงจากประมาณ $12,500,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day}$ เหลือ $155,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{day}$ หรือลดลงมากกว่าร้อยละ 95
- น้ำ: มุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 90 องศา และค่าการดูดซึมน้ำลดลงจาก $131.6 \text{ g}/\text{m}^2$ เหลือ $29.1 \text{ g}/\text{m}^2$
- ไอน้ำ: อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงจาก $346 \text{ g}/\text{m}^2.\text{day}$ เหลือ $304 \text{ g}/\text{m}^2.\text{day}$
- น้ำมันและไขมัน: การดูดซึมน้ำมันละหุ่งลดลงจาก $94 \text{ g}/\text{m}^2$ เหลือ $53 \text{ g}/\text{m}^2$ และค่า Kit test เพิ่มขึ้นจากระดับ 0 เป็นระดับ 2 ถึง 5

2. สารเคลือบผลิตจากวัสดุฐานชีวภาพ ใช้กระบวนการเคลือบจากสูตรผสมเดียว และเพิ่มน้ำหนักกระดาษน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษ

ศักยภาพการใช้งานของกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนไกล์คอลเชิงซ้อนที่มีองค์ประกอบของไซคาร์บูบา

สารเคลือบนี้มีศักยภาพสำหรับกระดาษห่ออาหาร ถู และภาชนะกระดาษที่ต้องการสมบัติกันหลายด้าน พร้อมช่วยลดการใช้สารเคลือบจากพลาสติกฐานปิโตรเลียม อย่างไรก็ตามยังต้องประเมินการผลิตระดับอุตสาหกรรม ความปลอดภัยในการสัมผัสอาหาร และความสามารถในการรีไซเคิลก่อนนำไปใช้เชิงพาณิชย์

ที่มาของข้อมูล

1. Sarah G. Fisher, Maya D. Montemayor, Alexandra Moran, Chiemeka Uwalaka, and Jaime C. Grunlan (2025), Biopolymer and Carnauba Wax Coating for Improved Paper Oxygen Barrier, Water Vapor Barrier, and Grease Resistance. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 17: 55307-55317. (<https://doi.org/10.1021/acsami.5c09638>)