

ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ: ศักยภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

ทัศนีย์ ปลั่งกลาง

ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อีเมล: ifrtnp@ku.ac.th

รับเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 3 กรกฎาคม 2568 ตอรับเมื่อ 16 กรกฎาคม 2568

จุดเด่น

- ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติเป็นตัวทำละลายสีเขียวที่มีความเป็นพิษต่ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- สามารถปรับแต่งองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมกับการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเป้าหมาย
- เพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

บทคัดย่อ

ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ (natural deep eutectic solvents, NADES) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะตัวทำละลายสีเขียวที่มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิม เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถปรับแต่งองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมกับการสกัดสารเป้าหมายได้หลากหลายชนิด งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า NADES สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตจากพืชชนิดต่าง ๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ บทความนี้นำเสนอภาพรวมเกี่ยวกับคุณสมบัติ ข้อดี ข้อจำกัด รวมถึงการประยุกต์ใช้ NADES ในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

คำสำคัญ: ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ การสกัดสีเขียว สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมอาหาร

Natural deep eutectic solvents: Potential for bioactive compound extraction from agro-food industry by-products

Thussanee Plangklang

Department of Food Chemistry and Physics, Institute of Food Research and Product Development,
Kasetsart University

E-mail: thussanee.p@ku.th

Received 19 May 2025; **Revised** 3 July 2025; **Accepted** 16 July 2025

Highlights:

- NADES are green solvents with low toxicity and biodegradability
- Chemical composition can be tailored for targeted bioactive compound extraction
- Enhances extraction efficiency of valuable compounds from agricultural and food industry biological waste

Abstract

Natural deep eutectic solvents (NADES) have garnered increasing attention as green solvents that offer significant advantages over conventional organic solvents, including low toxicity, biodegradability, and an adaptable chemical composition that can be customized for extracting various target compounds. Previous studies have demonstrated that NADES effectively enhance the extraction efficiency of antioxidants, polyphenols, proteins, and carbohydrates. This article provides a comprehensive overview of the properties, benefits, limitations, and applications of NADES in the extraction of bioactive compounds from agro-food industry by-products.

Keywords: Natural deep eutectic solvents, Green extraction, Bioactive compounds, Food industry by-products

บทนำ

อุตสาหกรรมเกษตรและอาหารก่อให้เกิดของเหลือหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จำนวนมาก ซึ่งผลิตภัณฑ์พลอยได้เหล่านี้ยังคงมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น สารฟีนอลิก โปรตีน และโพลีแซคคาไรด์ อย่างไรก็ตาม การสกัดสารเหล่านี้โดยใช้สารเคมีและตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิมมักก่อให้เกิดข้อกังวลด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยต่อสุขภาพ เนื่องจากสารเหล่านี้อาจเป็นพิษและย่อยสลายได้ยาก ด้วยเหตุนี้แนวทางการสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เช่น การสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤตและคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ (natural deep eutectic solvents, NADES) เป็นตัวทำละลายซึ่งกำลังได้รับความสนใจในฐานะตัวทำละลายสีเขียว ที่สามารถลดการใช้สารเคมีอันตราย พร้อมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากของเหลือในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

คุณสมบัติของตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ

คำว่า ยูเทคติก (eutectic) ถูกบัญญัติขึ้นโดย Frederick Guthrie⁽¹⁾ ซึ่งผสมภาษากรีก คำว่า “eu” ที่แปลว่า ดี หรือ ง่าย และ “τηκτος” ที่หมายถึง การหลอมละลาย โดยรวมหมายถึง

สารประกอบที่เกิดจากองค์ประกอบตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้เกิดจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ จุดนี้เรียกว่า จุดยูเทคติก (eutectic point) ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการผสมสารสองชนิดหรือมากกว่าในอัตราส่วนที่แน่นอน

ตัวทำละลายดีพยูเทคติก (deep eutectic solvent, DES) เป็นสารผสมแบบยูเทคติกชนิดหนึ่ง โดยมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบอย่างชัดเจน ปัจจัยสำคัญที่ใช้แยกความแตกต่างระหว่างตัวทำละลายยูเทคติกและตัวทำละลายดีพยูเทคติก คือการเปรียบเทียบระหว่างจุดหลอมเหลวจริงและจุดหลอมเหลวเชิงทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการ Schröder – van Laar⁽²⁾

สมการ Schröder–van Laar ถูกพัฒนาภายใต้สมมติฐานที่ว่าองค์ประกอบในระบบไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ideal solution) โดยใช้ข้อมูลพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวและค่าจุดหลอมเหลวของสารบริสุทธิ์ในการคำนวณจุดหลอมเหลวของสารผสม หากระบบนั้นมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย จุดหลอมเหลวของสารผสมจะ

สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี หรือเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อย ซึ่งจัดว่าเป็นตัวทำละลายยูเทคติกทั่วไป

ในทางตรงกันข้าม หากจุดหลอมเหลวที่เกิดขึ้นจริงต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีอย่างชัดเจน ระบบนั้นจะแสดงลักษณะของระบบดีพยูเทคติก โดยทั่วไปลักษณะดังกล่าวเกิดจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้งสองในระดับโมเลกุล โดยเฉพาะการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงและซับซ้อนระหว่าง hydrogen bond donor (HBD) และ hydrogen bond acceptor (HBA) ปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจะรบกวนการจัดเรียงตัวของผลึก ส่งผลให้โครงสร้างผลึกไม่สามารถก่อตัวได้อย่างเสถียร และต้องการพลังงานในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวน้อยลง ส่งผลให้จุดหลอมเหลวของระบบสารผสมลดลงต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีอย่างมีนัยสำคัญ

ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติ หรือ NADES หมายถึง DES ที่มีองค์ประกอบทั้ง HBD และ HBA เป็นสารที่มาจากสารธรรมชาติ เช่น กรดอินทรีย์ น้ำตาล กรดอะมิโน และพอลิแอลกอฮอล์ ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา⁽³⁾ NADES ไม่ติดไฟ มีความดันไอต่ำ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ และสามารถย่อยสลายได้ง่าย จึงเป็นตัวเลือกที่ยั่งยืนมากกว่าในเชิงสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย

อินทรีย์แบบดั้งเดิม เช่น เมทานอล อะซิโตนและเฮกเซน ดังแสดงใน Table 1

ในฐานะตัวทำละลาย NADES มีทั้งกลไกการสกัดทางตรง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิสัมพันธ์กับสารเป้าหมายโดยตรง โดยส่วนใหญ่จะเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสารเป้าหมาย และกลไกการสกัดทางอ้อม โดยการทำลายผนังเซลล์เพื่อปลดปล่อยสารเป้าหมายออกจากเมทริกซ์ของพืช^(4,5) คุณสมบัติหลักของ NADES เช่น ความหนืด ความหนาแน่น การนำไฟฟ้า แรงตึงผิว ความดันไอ และความเป็นขั้ว สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเลือกชนิดของส่วนประกอบและการปรับอัตราส่วนโมลระหว่าง HBD และ HBA ซึ่งความยืดหยุ่นในการออกแบบองค์ประกอบนี้ทำให้ NADES มีความสามารถในการละลายและสกัดสารได้หลากหลายชนิด นอกจากนี้การเติมน้ำเข้าไปในระบบยังเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของ NADES โดยช่วยลดความหนืด เพิ่มการนำไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงความเป็นขั้ว รวมถึงเพิ่มการถ่ายเทมวลและความสามารถในการละลาย ส่งผลให้การสกัดสารเป้าหมายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น^(6, 7) ข้อดีอีกประการของการสกัดด้วย NADES คือ สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ และยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานและลดการพึ่งพาสารเคมีที่เป็นอันตราย ทำให้สารสกัดที่ได้มีความปลอดภัย เหมาะสำหรับ

การใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร เกษษกรรม และ
เครื่องสำอาง

อย่างไรก็ตาม NADES ยังมีข้อจำกัดบาง
ประการ โดยเฉพาะความหนืดสูง ซึ่งส่งผลต่อการ
ไหลและการถ่ายเทมวล แม้การเติมน้ำจะช่วยลด
ความหนืดได้ แต่ก็อาจลดประสิทธิภาพในการสกัด
ลง การเลือกองค์ประกอบของ NADES ยังต้อง
อาศัยการศึกษาวิจัย เพื่อให้ได้ NADES ที่เหมาะสม
กับสารเป้าหมาย นอกจากนี้การใช้งานในระดับ
อุตสาหกรรมยังคงต้องการการพัฒนาเทคโนโลยีที่
รองรับ เช่น การออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับ
ของเหลวที่มีความหนืดสูง และระบบการนำตัวทำ
ละลายกลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ
ด้านต้นทุนการผลิตนั้น แม้โดยทั่วไป NADES จะใช้
วัตถุดิบจากธรรมชาติเป็นหลัก แต่ในบางกรณีอาจ
ต้องใช้สารที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งอาจมีราคาแพง
และส่งผลต่อต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ ใน
ส่วนของการแยก NADES ออกจากสารสกัด เมื่อ
เทียบกับตัวทำละลายทั่วไป NADES มีคุณสมบัติ
ทางกายภาพและเคมีที่ทำให้การแยกออกทำได้ยาก

กว่าตัวทำละลายแบบดั้งเดิม วิธีที่มีการใช้อยู่ใน
ปัจจุบัน เช่น การระเหย การตกตะกอน ไดอะไลซิส
หรือโครมาโทกราฟี อาจยังไม่มีประสิทธิภาพ
เพียงพอหรือมีต้นทุนสูงเกินไปสำหรับการใช้งานใน
ระดับอุตสาหกรรม

อย่างไรก็ตาม NADES เป็นระบบตัวทำ
ละลายที่ประกอบด้วยสารธรรมชาติ ซึ่งหลาย
องค์ประกอบได้รับการยอมรับว่าเป็นวัตถุเจือปน
อาหารหรือสามารถบริโภคได้โดยไม่ก่อให้เกิด
อันตราย ทำให้สามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร
หรือใช้เป็นส่วนประกอบอาหารฟังก์ชันได้โดยไม่
จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกตัวทำละลายออก
ก่อนใช้งานขั้นสุดท้าย เช่น การใช้เป็นส่วนผสมของ
ผลิตภัณฑ์อาหารหรือเครื่องสำอาง นอกจากนี้
NADES ยังมีคุณสมบัติในการรักษาเสถียรภาพของ
สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สกัดได้ ด้วยคุณสมบัติ
เหล่านี้ การใช้ NADES ในการสกัดจึงสามารถลด
ความจำเป็นในกระบวนการแยกสาร (downstream
processing) และอาจส่งผลโดยตรงต่อการลดต้นทุน
การผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์เสริม
อาหาร^(8, 9)

Table 1 Properties of NADES and common organic solvents

Properties	NADES	Common Organic Solvents
1. Solubility and Selectivity for Target Compounds	Formulations can be tailored to specific target compounds; Suitable for both polar and non-polar substances.	High solubility efficiency, especially for low to moderately polar compounds; selectivity is relatively constant depending on the type of solvent.
2. User Safety	High safety profile; non-volatile, non-flammable, and non-toxic to the human body.	Many are toxic, volatile, flammable, and may affect the nervous system or internal organs.
3. Environmental Friendliness	Biodegradable and derived from natural raw materials.	Poor biodegradability; likely to cause contamination and environmental pollution.
4. Cost of Production and Usage	Made from inexpensive raw materials like sugars and organic acids; however, costs may increase if high purity is required.	Generally inexpensive and widely available, though some types can be costly, especially at high purity levels.
5. Ease of Use	High viscosity; may require dilution with water or additional temperature and stirring; not yet widely commercialized.	Supported by established systems and technologies for large-scale industrial use.
6. Separation from Extracts and Reusability	Difficult to separate from extracts; requires specialized techniques; has potential for reuse but needs further research.	Easily evaporated and separated by distillation; reusable.

การใช้ NADES ในการสกัดสารออกฤทธิ์จากผลิตภัณฑ์พลอยได้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

การใช้ NADES ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากของเหลือทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยมักนิยมใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีการสกัดสมัยใหม่ เช่น การสกัดด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ (ultrasound-assisted extraction, UAE) การสกัดด้วยไมโครเวฟ (microwave-assisted extraction, MAE) การสกัดของเหลวภายใต้ความดัน (pressurized liquid extraction, PLE) หรือการใช้รังสีอินฟราเรด ซึ่งแต่ละวิธีล้วนมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการแทรกซึมของตัวทำละลายและการถ่ายโอนมวลของสารออกฤทธิ์จากเมทริกซ์ของวัสดุชีวภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านระยะเวลาและปริมาณสารสกัดที่ได้

การเลือกใช้ NADES พิจารณาได้จากคุณสมบัติทางเคมีของสารเป้าหมาย ตามหลักการ "like dissolves like" โดยเลือก NADES ที่มีคุณสมบัติด้านความมีขั้วใกล้เคียงกับสารที่ต้องการสกัด สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจำนวนมากมักมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อะมิโน (-NH₂) หรือคาร์บอกซิล (-COOH) ดังนั้น การเลือก HBD และ HBA ที่เหมาะสมจะช่วยสร้างเครือข่ายพันธะไฮโดรเจนกับ

สารเป้าหมายและเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้นอกจากนี้ความเสถียรของสารออกฤทธิ์ยังขึ้นกับ pH ของ NADES ที่ใช้ สารบางชนิดอาจไวต่อสภาวะเป็นกรดหรือด่าง จึงต้องพิจารณาเลือก NADES ที่มีค่า pH เหมาะสมเพื่อรักษาโครงสร้างและคุณสมบัติของสารไม่ให้เปลี่ยนแปลง อีกทั้ง NADES บางชนิดยังสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์จำเพาะกับสารเป้าหมาย เช่น NADES ที่มีสมบัติเป็นกรดอาจช่วยตัดพันธะไกลโคซิดิกได้ หรือ NADES บางชนิดสามารถคงสภาพโครงสร้างโปรตีนได้ดีกว่า ในขณะเดียวกันปัจจัยภายนอกอื่น เช่น อุณหภูมิ เวลา และเทคนิคการสกัด ล้วนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการสกัด

สารประกอบฟีนอลิก เป็นกลุ่มสารเป้าหมายที่มีความสำคัญทางชีวภาพสูง โดยเฉพาะในด้านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สารเหล่านี้มักมีลักษณะขั้วปานกลางถึงสูง มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในโครงสร้างจำนวนมาก และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ง่าย ดังนั้น NADES ที่เหมาะสมสำหรับสารฟีนอลิกควรมีขั้วปานกลางถึงสูง และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ดี โดยเฉพาะ NADES ที่มีกรดอินทรีย์ หรือเลือกใช้ HBD ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก เช่น กลีเซอรอล ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสารประกอบฟีนอลิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความสามารถในการสกัดหรือละลายสารเป้าหมายได้ดีขึ้น งานวิจัยหลายชิ้น

รายงานผลลัพธ์ที่น่าสนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ NADES ในการสกัดสารฟีนอลิกและต้านอนุมูลอิสระจากแหล่งต่าง ๆ Panic และคณะ⁽¹⁰⁾ รายงานว่า การใช้โคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดซิตริกสกัดโพลีฟีนอลจากกากองุ่นมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับสารสกัดที่ได้จากการสกัดโดยใช้เอทานอลทั้งในแง่ปริมาณสารฟีนอลิกรวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและการยับยั้งการเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็ง HeLa และ MCF-7 Chanioti และ Tzia⁽¹¹⁾ พบว่า การใช้ NADES ร่วมกับเทคนิคการสกัดสมัยใหม่ เช่น การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenate assistance extraction, HAE) MAE UAE หรือแม้แต่การใช้แรงดันสูง ให้ผลการสกัดดีกว่าการใช้ตัวทำละลายทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยการสกัดสารฟีนอลิกจากกากมะกอกได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น เมื่อใช้ HAE ร่วมกับโคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดซิตริก และโคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดแกลกติก ในทำนองเดียวกัน Popovic และคณะ⁽¹²⁾ รายงานผลการสกัดแอนโทไซยานินจากกากเชอร์รี่เปรี้ยวด้วยโคลีนคลอไรด์ผสมกับยูเรียโคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดมาลิก และโคลีนคลอไรด์ผสมกับฟรุกโตส โดยพบว่า โคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดมาลิกให้ผลผลิตสูงถึง 62% ซึ่งสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม (เอทานอล 50% หรือเมทานอลที่มีกรดไฮโดรคลอริก 0.1%) ในขณะที่ Ozturk และคณะ⁽¹³⁾ แสดงให้เห็นว่าโคลีนคลอไรด์ผสมกับกลีเซอรอล และโคลีนคลอไรด์ผสมกับเอทิลีนไกลคอลมีประสิทธิภาพในการสกัด

สารฟีนอลิกจากเปลือกส้ม ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า NADES ช่วยให้ผนังเซลล์ของเปลือกส้มแตกตัวได้ดี ส่งผลให้สามารถสกัดกรดเฟอรูลิก กรดคูมาริก และกรดแกลลิกได้ในปริมาณสูง

NADES ได้กลายเป็นทางเลือกที่มีแนวโน้มที่ดีในการสกัดโปรตีนจากพืช เนื่องจากมีความสามารถในการสกัดแบบเฉพาะเจาะจงและคงสภาพโครงสร้างของโปรตีนได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม การสกัดโปรตีนด้วย NADES ต้องคำนึงถึงโครงสร้างโปรตีนที่ซับซ้อน และความเปราะบางของโปรตีนที่อาจเสียสภาพได้ง่ายเมื่อเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม

โดยทั่วไปนิยมใช้โคลีนคลอไรด์เป็น HBA สำหรับโปรตีนที่ทนกรดสามารถเลือกใช้ HBD ที่เป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดแกลกติก ส่วนโปรตีนที่ไวต่อกรดหรือต่างควรเลือก HBD ที่มี pH ไม่ต่ำหรือสูงมากนัก เช่น กลีเซอรอล ยูเรีย หรือน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้ NADES ที่สร้างพันธะกับหมู่อะมิโนและคาร์บอกซิลของโปรตีนได้ดีจะช่วยให้การสกัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น การศึกษาการสกัดโปรตีนจากกากเปียร์โดยใช้โคลีนคลอไรด์ผสมกับทรีฮาโลสพบว่าให้ผลผลิตโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยแบบดั้งเดิม โดยลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของโปรตีนที่ได้จากการสกัดทั้ง 2 วิธี เช่น น้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างทุติยภูมิ องค์ประกอบกรดอะมิโน

และความสามารถในการอุ้มน้ำหรือน้ำมันของโปรตีนที่ได้จากการสกัดทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ⁽¹⁴⁾ ในขณะที่ Lin และคณะ⁽¹⁵⁾ พบว่า การสกัดโปรตีนจากกากเมล็ดชิบคธอร์น (seabuckthorn seed meal) โดยใช้โคลีนคลอไรด์ ผสมกับกลีเซอรอล โคลีนคลอไรด์ ผสมกับกรดออกซาลิก และโคลีนคลอไรด์ ผสมกับยูเรีย ให้ผลผลิตอยู่ในช่วง 31.0–41.4% และมีความเข้มข้นของโปรตีนระหว่าง 64.3–67.5% แม้ว่าปริมาณโปรตีนที่ได้จะต่ำกว่าการสกัดด้วยต่าง แต่โปรตีนที่สกัดได้ด้วย NADES มีโครงสร้าง β -sheet ลดลง และมีโครงสร้าง β -turn เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางชีวภาพที่ดีขึ้น รวมถึงมีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นและกรดอะมิโนรวมสูงกว่าวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้โปรตีนที่สกัดด้วยโคลีนคลอไรด์ ผสมกับยูเรียยังคงมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับโปรตีนตั้งต้นของกากเมล็ดชิบคธอร์น บ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้างโปรตีนที่สกัดได้อีกทั้งค่าการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility) โดยเอนไซม์เพปซินยังสูงถึง 54.2% Guzmán-Lorite และคณะ⁽¹⁶⁾ พบว่าการสกัดโปรตีนจากเมล็ดทับทิมด้วย NADES ที่เป็นการรุดตามด้วยการสกัดโดยใช้เทคนิค PLE ภายใต้สภาวะต่าง ให้ผลการสกัดโปรตีนที่ดียิ่งขึ้น โดยสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนที่สกัดได้เป็น 2 เท่า เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างหลังจากจำลองกระบวนการย่อย

อาหารในระบบทางเดินอาหารและการระบุเปปไทด์พบว่าในไฮโดรไลเซตที่ได้จากการสกัดด้วย NADES มีเปปไทด์ 19 ชนิด โดย NADES มีแนวโน้มที่จะสกัดโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่าในกระบวนการสกัดยังพบสารออกฤทธิ์อื่น ๆ ที่ถูกสกัดร่วมกับโปรตีนด้วย เช่น สารประกอบฟีนอลิก กรดอะมิโน และกรดไขมัน Grudniewska และคณะ⁽¹⁷⁾ ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโปรตีนจากกากเมล็ดเรพชิตและกากเมล็ดอ์ฟนิ่งพริมโรสโดยใช้โคลีนคลอไรด์ ผสมกับกลีเซอรอล พบว่าการตกตะกอนของโปรตีนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด โดยสารสกัดที่ได้มีปริมาณโปรตีนประมาณ 40–50% เมื่อทำการสกัดที่ 140 °C และจากผลการวิเคราะห์ด้วย SDS-PAGE พบว่า NADES สามารถเลือกสกัดโปรตีนกลุ่ม cruciferin ที่มีขนาดโมเลกุลประมาณ 16–33 kDa จากกากเมล็ดเรพชิตได้อย่างจำเพาะเจาะจง ส่วนโปรตีนที่ได้จากกากเมล็ดอ์ฟนิ่งพริมโรสจะมีขนาดที่หลากหลายมากกว่า (10–40 kDa)

ความสามารถในการให้และรับโปรตอนของ NADES โดยเฉพาะโปรตอนที่ได้จากการดอินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการตัดพันธะไกลโคซิดิกแบบ β -1,4 ซึ่งเป็นพันธะหลักในการเชื่อมต่อหน่วยน้ำตาลในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส⁽¹⁸⁾ คุณสมบัติดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูปชีวมวล โดยเฉพาะการทำลายโครงสร้างที่เชื่อมโยงระหว่าง

ลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง⁽¹⁹⁾ งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ NADES ในการเตรียมวัสดุชีวมวล เช่น ชานอ้อย ก่อนเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำตาล ไขมัน และลิกนินได้สูงกว่าการใช้ ความร้อนชื้น (hydrothermal treatment)^(20, 21) ในขณะที่ Bamigbade และคณะ⁽²²⁾ ใช้เทคนิค MAE ร่วมกับโคลีนคลอไรด์ผสมกับกรดซิตริก ในการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากกากอินทผลัม โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 400 วัตต์ ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 5 นาที ที่สภาวะดังกล่าวให้ผลผลิตสูงถึง 48.8 mg/mL และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์และต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทสรุป

ตัวทำละลายดีพยูเทคติกจากธรรมชาติเป็นนวัตกรรมที่โดดเด่นในฐานะตัวทำละลายสีเขียวที่มี

ศักยภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์จากวัสดุเหลือใช้ ในอุตสาหกรรมอาหารและเกษตร ด้วยองค์ประกอบจากสารธรรมชาติและความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทำให้ NADES มีจุดหลอมเหลวต่ำและคุณสมบัติการละลายที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถปรับแต่งคุณสมบัติได้อย่างหลากหลายผ่านการเลือกองค์ประกอบ หรือการเติมน้ำเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารเป้าหมาย NADES แสดงศักยภาพที่เหนือกว่าตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปในการสกัดสารฟีนอลิก โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตจากวัสดุเหลือใช้หลายชนิด โดยยังคงคุณสมบัติทางชีวภาพของสารสกัดได้อย่างดี อย่างไรก็ตาม NADES ยังมีข้อจำกัดด้านความหนืดและความท้าทายในการแยกตัวทำละลายออกจากสารสกัด แต่ด้วยความปลอดภัย ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงความเป็นไปได้ที่อาจไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการแยกสาร การใช้ NADES จึงเป็นทางเลือกที่มีแนวโน้มในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Guthrie F. LII. On Eutexia. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1884;17(108):462-82.
2. Oyou F, Toncheva A, Henríquez LC, Grougnet R, Laoutid F, Mignet N, Alhareth K, Corvis Y. Deep Eutectic Solvents: An Eco-friendly Design for Drug Engineering. ChemSusChem. 2023;16(20):e202300669.
3. Hikmawanti NP, Ramadon D, Jantan I, Mun'im A. Natural Deep Eutectic Solvents (NADES): Phytochemical Extraction Performance Enhancer for Pharmaceutical and Nutraceutical Product Development. Plants. 2021;10(10).

4. Usmani Z, Sharma M, Tripathi M, Lukk T, Karpichev Y, Gathergood N, Singh BN, Thakur VK, Tabatabaei M, Gupta VK. Biobased natural deep eutectic system as versatile solvents: Structure, interaction and advanced applications. *Science of The Total Environment*. 2023;881:163002.
5. Kalhor P, Ghandi K. Deep eutectic solvents for pretreatment, extraction, and catalysis of biomass and food waste. *Molecules*. 2019;24(22).
6. Mohd Fuad F, Mohd Nadzir M, Harun@Kamaruddin A. Hydrophilic natural deep eutectic solvent : A review on physicochemical properties and extractability of bioactive compounds. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;339:116923.
7. Lajoie L, Fabiano-Tixier A-S, Chemat F. Water as green solvent: methods of solubilisation and extraction of natural products—past, present and future solutions. *Pharmaceuticals*. 2022;15(12).
8. de los Ángeles Fernández M, Boiteux J, Espino M, Gomez FJ, Silva MF. Natural deep eutectic solvents-mediated extractions: The way forward for sustainable analytical developments. *Analytica Chimica Acta*. 2018;1038:1-10.
9. da Silva DT, Smaniotto FA, Costa IF, Baranzelli J, Muller A, Somacal S, Monteiro CSA, Vizzotto M, Rodrigues E, Barcia MT. Natural deep eutectic solvent (NADES): A strategy to improve the bioavailability of blueberry phenolic compounds in a ready-to-use extract. *Food Chemistry*. 2021;364:130370.
10. Panić M, Stojković MR, Kraljić K, Škevin D, Redovniković IR, Srček VG, Radošević K. Ready-to-use green polyphenolic extracts from food by-products. *Food Chemistry*. 2019;283:628-36.
11. Chanioti S, Tzia C. Extraction of phenolic compounds from olive pomace by using natural deep eutectic solvents and innovative extraction techniques. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018;48:228-39.
12. Popovic BM, Micic N, Potkonjak A, Blagojevic B, Pavlovic K, Milanov D, Juric T. Novel extraction of polyphenols from sour cherry pomace using natural deep eutectic solvents–Ultrafast microwave-assisted NADES preparation and extraction. *Food Chemistry*. 2022;366:130562.
13. Ozturk B, Parkinson C, Gonzalez-Miquel M. Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*. 2018;206:1-13.
14. Hadinoto K, Ling JK-U, Park J-W, Tran T-T, Pu S. Extraction of brewer's spent grain protein using natural deep eutectic solvent compared to alkaline extraction: Evaluating their yields, physicochemical characteristics, and functionalities. *Food and Bioproducts Processing*. 2025;150:12-24.
15. Lin J, Xiang H, Sun-Waterhouse D, Cui C, Wang W. Deep eutectic solvents and alkaline extraction of protein from seabuckthorn seed meal: a comparison study. *Food Science and Human Wellness*. 2022;11(4):1028-35.
16. Guzmán-Lorite M, Marina ML, García MC. Successive extraction using natural deep eutectic solvents and pressurized liquids for a greener and holistic recovery of proteins from pomegranate seeds. *Food Research International*. 2022;161:111862.
17. Grudniewska A, de Melo EM, Chan A, Gniłka R, Boratyński F, Matharu AS. Enhanced protein extraction from oilseed cakes using glycerol–choline chloride deep eutectic solvents: A biorefinery approach. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018;6(11):15791-800.
18. Ji Q, Tan CP, Yagoub AEA, Chen L, Yan D, Zhou C. Effects of acidic deep eutectic solvent pretreatment on sugarcane bagasse for efficient 5-hydroxymethylfurfural production. *Energy Technology*. 2021;9(9):2100396.



19. Liu Y, Chen W, Xia Q, Guo B, Wang Q, Liu S, Liu Y, Li J, Yu H. Efficient cleavage of lignin-carbohydrate complexes and ultrafast extraction of lignin oligomers from wood biomass by microwave-assisted treatment with deep eutectic solvent. *ChemSusChem*. 2017;10(8):1692-700.
20. Raj T, Chandrasekhar K, Morya R, Kumar Pandey A, Jung J-H, Kumar D, Singhania RR, Kim S-H. Critical challenges and technological breakthroughs in food waste hydrolysis and detoxification for fuels and chemicals production. *Bioresource Technology*. 2022;360:127512.
21. Raj T, Singh V. Natural deep eutectic solvents (NADES) assisted deconstruction of oilcane bagasse for high lipid and sugar recovery. *Industrial Crops and Products*. 2024;210:118127.
22. Bamigbade GB, Subhash AJ, Al-Ramadi B, Kamal-Eldin A, Gan R-Y, Liu SQ, Ayyash M. Gut microbiota modulation, prebiotic and bioactive characteristics of date pomace polysaccharides extracted by microwave-assisted deep eutectic solvent. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;262:130167.