

การเพิ่มความคงตัวของน้ำมันหอมระเหยด้วยอินคลูชันคอมเพลกซ์ของไซโคลเดกซ์ทริน Enhancement of essential oil stability by cyclodextrins inclusion complex

วันทนี น้อยจินดา, อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์*

Wantanee Noichinda, Inthawoot Suppavorasatit*

Received: June 17, 2019

Revised: September 18, 2019

Accepted: October 1, 2019

บทคัดย่อ

สารระเหยให้กลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวในน้ำมันหอมระเหยจากพืช ส่วนใหญ่ไม่คงตัวและระเหยได้ง่ายเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปหรือเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน ประกอบกับน้ำมันหอมระเหยมีสมบัติในการละลายน้ำที่ไม่ดี การใช้เทคนิคการห่อหุ้ม (encapsulation) เป็นการช่วยให้น้ำมันหอมระเหยมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งการห่อหุมน้ำมันหอมระเหยด้วยไซโคลเดกซ์ทริน (CDs) เกิดเป็นสารประกอบอินคลูชัน ช่วยให้มีเสถียรภาพและสมบัติการละลายน้ำได้ดีขึ้น การเตรียมสารประกอบอินคลูชันขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำมันหอมระเหยและชนิดของ CDs สารประกอบอินคลูชันระหว่างน้ำมันหอมระเหยกับ CDs จะมีความคงตัวต่อความร้อนและรังสี ทำให้มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ต้านการเจริญของจุลินทรีย์ และเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำให้ดีขึ้นได้นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันหอมระเหยได้อีกด้วย และด้วยคุณสมบัติเด่นนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้สารประกอบอินคลูชันของน้ำมันหอมระเหยกับ CDs ในอุตสาหกรรมอาหารและยาได้หลากหลาย

คำสำคัญ: น้ำมันหอมระเหย, ความคงตัว, อินคลูชันคอมเพลกซ์, ไซโคลเดกซ์ทริน, การห่อหุ้ม

ABSTRACT

Most of volatile aroma compounds, which are characteristics of each plant essential oil, are not stable and can be volatilized during processing or long time storage. In addition, the essential oils show poor solubility property. Encapsulation techniques can enhance essential oil stability. Encapsulation of essential oils by cyclodextrins (CDs) can form inclusion complex, which helps increasing stability and solubility of essential oils. Preparation of inclusion complex depends on essential oil properties and CDs types. After inclusion complex between essential oils and CDs is formed, the thermal and irradiation stability can be improved as well as anti-oxidation property, antimicrobial property, and solubility. Moreover, the release of volatile aroma compounds in essential oils can be controlled by inclusion complex. With these unique properties of CDs inclusion complex, it can be applied into various food and medical industries.

Keywords: essential oil, stability, inclusion complex, cyclodextrin, encapsulation

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

น้ำมันหอมระเหย (essential oil)

น้ำมันหอมระเหย คือสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (secondary metabolite) ที่พืชสร้างขึ้นมาเพื่อป้องกันตัวเองจากสิ่งรบกวน เช่นสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม การเข้าทำลายของแมลงและเชื้อที่เป็นสาเหตุของโรคพืช ส่วนใหญ่มีกลิ่นหอม (aroma) นิยมใส่ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นเฉพาะที่เป็นเอกลักษณ์ของพืชชนิดนั้นๆ นอกจากนั้นยังมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและต้านการเจริญของจุลินทรีย์ได้ มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปจะสกัดน้ำมันหอมระเหยได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น สกัดน้ำมันหอมระเหยจากกลีบและมะลิจากส่วนของดอก น้ำมันหอมระเหยโรสแมรี่และยูคาลิปตัสจากส่วนของใบ น้ำมันหอมระเหยจากส่วนของลำต้นใต้ดิน น้ำมันหอมระเหยไพล์จากส่วนของผลและเมล็ด น้ำมันหอมระเหยส้มจากส่วนของผลและเปลือกของผล และน้ำมันหอมระเหยอบเชยจากส่วนของเปลือก ซึ่งน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดจะให้กลิ่นตามสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน [1] น้ำมันหอมระเหยมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารผสมของสารเคมีกลุ่มต่าง ๆ เช่น terpene, alcohol, acid, ester, epoxide, aldehyde, ketone และ amine [2, 3] ซึ่งเป็นสารประกอบให้กลิ่นที่สามารถระเหยได้ง่ายและไม่คงตัว หากมีปัจจัยภายนอกเข้ามากระตุ้น เช่นแสง ออกซิเจน และความร้อน จะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสูญเสียลักษณะกลิ่นตามธรรมชาติไป ความคงตัวของน้ำมันหอมระเหยจึงมีความสำคัญเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภคโดยตรง ธรรมชาติของน้ำมันหอมระเหยมักมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์ จึงมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปของน้ำมันหอมระเหยให้มีความสามารถละลายน้ำได้ จึงจะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางหลากหลาย มีการใช้เทคนิคการห่อหุ้ม (encapsulation) เพื่อปรับปรุงและป้องกันการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ

ที่สำคัญในน้ำมันหอมระเหยจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการระเหยของสารระเหยให้กลิ่นระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความคงตัว กักเก็บสารประกอบให้กลิ่นได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร นอกจากนี้เมื่อผ่านการทำ encapsulation แล้ว สถานะของน้ำมันหอมระเหยมีความเป็นของแข็งทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น และยังสามารถลดพื้นที่ในการจัดเก็บและลดค่าใช้จ่ายได้อีกด้วย

ไซโคลเดกซ์ทริน (cyclodextrins)

ไซโคลเดกซ์ทริน (cyclodextrins; CDs) เป็นคาร์โบไฮเดรต มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีการจัดเรียงตัวสามมิติคล้ายรูปกรวยกันตัด (Figure 1) โครงสร้างของ CDs ประกอบด้วยน้ำตาลแอลฟา-ดี-กลูโคส (alpha-D-glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) แบบ beta-(1,4) ผิวด้านนอกมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ส่วนผิวด้านใน (cavity) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) CDs Table 1 แสดงสมบัติทางเคมีกายภาพของ CDs ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งออกตามขนาดของโมเลกุลคือ แอลฟา-ไซโคลเดกซ์ทริน (alpha-cyclodextrin; α -CD) บีตา-ไซโคลเดกซ์ทริน (beta-cyclodextrin; β -CD) และแกมมา-ไซโคลเดกซ์ทริน (gamma-cyclodextrin; γ -CD) ซึ่งมีจำนวนน้ำตาลกลูโคสเท่ากับ 6, 7 และ 8 หน่วย (Figure 2) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 นาโนเมตรตามลำดับ [4] มีการใช้ CDs ในอุตสาหกรรมอาหารและยาอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถเติมลงไปเพื่อใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ตัวพาสารให้กลิ่นรส (flavor carrier) CDs จะไม่ถูกย่อยในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก แต่จะถูกจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ย่อยสลาย นอกจากนี้ยังพบว่า CDs มีความปลอดภัยโดยได้รับการรับรอง Generally Recognized As Safe (GRAS) ตามประกาศขององค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ [5]

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

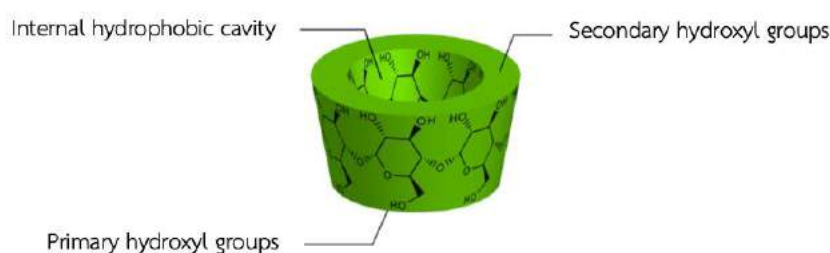
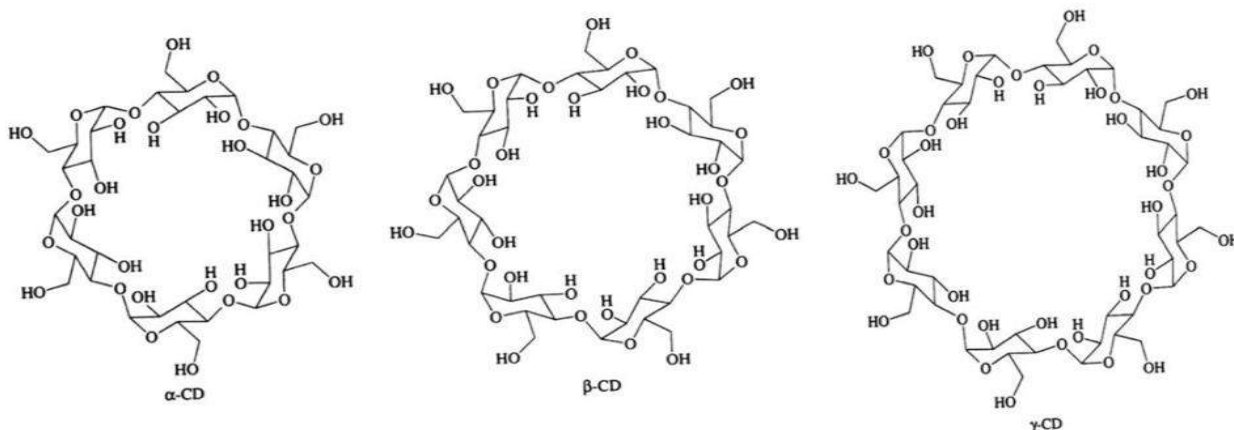


Figure 1 3D structure of CDs [6]

Figure 2 Chemical structure of α , β and γ -CD [6]

CDs ผลิตได้จากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ แอลฟา-แอมิเลส (alpha-amylase) และ ไซโคลเดกซ์ทริน กลูโคซิลทรานส์เฟอเรส (cyclodextrin glucosyl transferase, CGTase) โดยนิยมผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง หรือแป้ง ข้าวโพดมากกว่าแป้งข้าวสาลี เนื่องจากในแป้งข้าวสาลีมี สัดส่วนของแอมิโลส (amylose) มากกว่า ซึ่งจะทำให้ ได้ผลผลิตน้อยกว่าแอมิโลเพกทิน (amylopectin) จากแป้ง มันสำปะหลังหรือแป้งข้าวโพด CDs มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่ โพร่งภายในของโมเลกุลจึงสามารถจับสารที่มีขั้วน้อยได้ดี และมีสมบัติชอบน้ำบริเวณผิวด้านภายนอกจึงสามารถ ละลายน้ำได้ แต่ความสามารถในการละลายของ CDs ยังค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความเหมาะสมในการใช้งาน บางประเภท คือ สามารถละลาย α -CD ได้ 14 กรัม หรือ γ -CD 23 กรัม ในน้ำ 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส ในขณะที่ β -CD สามารถละลายได้เพียง 1.8

กรัม เท่านั้น [9] ทั้งนี้การที่ β -CD มีความสามารถ ละลายต่ำ เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาภายในและ ภายนอกของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จึง จำเป็นต้องมีการดัดแปรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ละลายน้ำของ β -CD ที่บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ของโครงสร้าง โดยพบว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอน ตำแหน่งที่ 6 มีความสามารถในการทำอันตรกิริยาสูงสุด รองลงมาเป็นตำแหน่งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่ง β -CD ที่ถูกดัดแปรจะมีสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างไป จากเดิม ซึ่งอาจทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำและ ควบคุมการปลดปล่อยได้ดียิ่งขึ้น ยกตัวอย่างอนุพันธ์ของ CDs ที่ผ่านการดัดแปร เช่น hydroxypropyl- β -CD, methyl- β -CD, 2,6-di-O-methyl- β -CD และ 2,3,6-per-O-methyl- β -CD

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

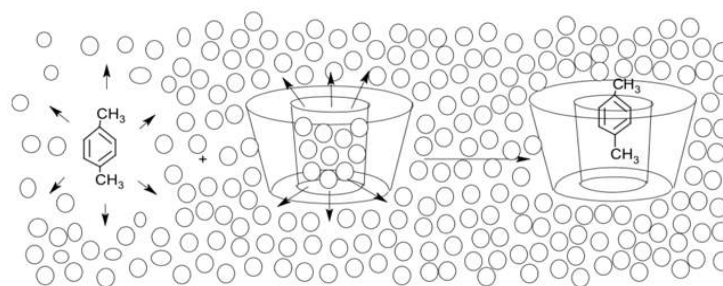
Table 1 Physicochemical characteristics of α -CD, β -CD and γ -CD [6,7]

physicochemical properties	α -CD	β -CD	γ -CD
Glucose units	6	7	8
Chemical formula	C ₃₆ H ₆₀ O ₃₀	C ₄₂ H ₇₀ O ₃₅	C ₄₈ H ₈₀ O ₄₀
Molecular weight	972	1135	1297
Cavity diameter (Å)	5.7	7.8	9.5
Cycle diameter (Å)	14.6-15	15.4-15.8	17.5-17.9
Cavity volume (Å ³)	173	262	427
Aqueous solubility at 25 °C (g 100 mL ⁻¹)	14	1.8	23
Melting point (°C)	275	280	275

สารประกอบอินclusion (inclusion complex)

จากที่กล่าวข้างต้น ไฮโดรเจนไดออกไซด์ มีโครงสร้าง เป็น น้ำตาลแอลฟา-ดี-กลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก แบบ beta-(1,4) เกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ รูปกรวยก้น ตัดที่มีโพรงด้านใน จากการจัดเรียงตัวนี้มี secondary hydroxyl group ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 อยู่บริเวณ ขอบด้านกว้างของวง ในขณะที่ primary hydroxyl group ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 อยู่ที่ขอบด้านตรงข้าม และยังมี ไฮโดรเจนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 รวมทั้งออกซิเจน อยู่ภายในโพรงของ CDs เป็นผลให้บริเวณภายในโพรงของ CDs สามารถจับกับสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ในขณะที่ผิวภายนอก มีสมบัติที่ชอบน้ำจึงสามารถละลายน้ำได้ ในกรณีของการ เกิดสารประกอบอินclusion ของ CDs กับน้ำมันหอมระเหย นั้น เมื่อละลาย CDs ในน้ำจะมีโมเลกุลของน้ำเข้าไปอยู่ ภายในบริเวณโพรงของ CDs (host) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง driving force บริเวณโพรงภายใน โมเลกุลน้ำจะถูกแทนที่ ด้วยโมเลกุลของน้ำมันหอมระเหย (hydrophobic guest) ซึ่งจะเข้าไปทำอันตรกิริยาแบบ apolar-apolar ทำให้ระบบ มีพลังงานลดต่ำลงและมีความเสถียรมากขึ้น อธิบายการ เกิดสารประกอบอินclusion จาก Figure 3 โดยมีขั้นตอนดังนี้

โมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยในสารละลายจะเกิดแรงผลัก (repulsive interaction) ระหว่างโมเลกุลน้ำที่อยู่รอบๆ ในขณะที่ภายในโพรงของ CDs เกิดการเพิ่มจำนวนของ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) เป็นผลมาจากการ แทนที่ของน้ำภายในโพรง CDs รวมถึงการลดแรงผลัก ระหว่างโมเลกุลน้ำมันหอมระเหยกับน้ำที่อยู่รอบๆ โดยเพิ่ม แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ทำให้โมเลกุลน้ำมันหอมระเหยสอดตัวเองเข้าไป ภายในโพรงของ CDs ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม อาจมีแรงอย่างอื่นเช่น แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) และ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole) เข้ามา เกี่ยวข้องด้วย [8] ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงมากนัก ทั้งนี้มี หลายปัจจัยที่เข้ามามีผลต่อการเกิดสารประกอบอินclusion ดังกล่าวด้วย เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงภายใน CDs, pH, ionization state รวมถึงวิธีการเตรียมสารประกอบ อินclusion นอกจากนี้ CDs ยังสามารถจับกันเองด้วยพันธะ โคเวเลนต์ (covalent) และ นอนโคเวเลนต์ (non-covalent) จนเกิดเป็น building blocks โครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน (supramolecular complex) [9]

**Figure 3** Schematic illustration of inclusion complexation of hydrophobic guest by CDs [10]

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

การเตรียมสารประกอบอินคลูชัน

วิธีเตรียมสารประกอบอินคลูชันมีหลายวิธีการ ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะนำมาเตรียม (guest) และ ชนิดของ CDs ที่เลือกใช้ รวมถึงตำแหน่งที่สารจะเข้าไป แทนที่บริเวณภายในโพรง CDs ด้วย โดยแต่ละวิธีการจะส่งผลถึงประสิทธิภาพผลผลิตของสารประกอบอินคลูชัน ได้ดังนี้ วิธี kneading เหมาะสำหรับสารที่ละลายน้ำได้ยาก เนื่องจากสารนั้นจะละลายน้ำอย่างช้า ๆ ระหว่างการ เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ โดยเริ่มจากเติมสารที่อยู่ในรูปของ ของเหลวหรือสารละลายลงไปในสารละลาย CDs จากนั้น นวดบดในครกแล้วจึงนำมาทำแห้ง ล้างของแข็งด้วยตัวทำ ละลายเพื่อขเศษเล็ก ๆ ที่ติดอยู่บนผิวของ CDs ออกและ นำไปทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ ยกตัวอย่างน้ำมันหอม ระเหยจากไทม์ ที่ใช้วิธีการนี้ในการผลิตสารประกอบ อินคลูชัน [7] เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับสารที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่วิธี co-precipitation ซึ่งมักได้ผลผลิตต่ำ เนื่องจาก เกิดการยับยั้งแบบแข่งขันของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ใน การตกตะกอน วิธีทำเริ่มจากการละลายสารในตัวทำ ละลายอินทรีย์ เช่น chloroform, benzene หรือ diethyl ether จากนั้นนำ CDs ที่ละลายในน้ำด้วยอัตราส่วนที่ เหมาะสม ใส่ลงไปในสารละลายและกวนผสม เมื่อสารละลาย เย็นตัวลงจนเกิดผลึก ผลึกเหล่านั้นจะถูกล้างด้วยตัวทำ ละลายอินทรีย์และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศา เซลเซียส มีรายงานการใช้วิธีนี้ในการผลิตสารประกอบ อินคลูชันของน้ำมันหอมระเหยกับ β -CD และ tran-anethole ที่เป็นสารประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหย จากเมล็ดยี่ห่วย (fennel) [11,12] แต่หากเป็นสารที่ระเหย ง่ายด้วยความร้อน (thermal labile) และสามารถละลาย น้ำได้ จะใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-drying หรือ lyophilization) โดยจะกวนสารผสมใน สารละลาย CDs และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำ ผงที่ได้มาล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และนำไปทำแห้ง ด้วยระบบสุญญากาศเพื่อให้ผลึกของสารประกอบอินคลู ชันแยกออกเป็นอิสระจากกัน ซึ่งวิธีการนี้สามารถผลิต สารประกอบอินคลูชันได้ดี เหมาะสำหรับการผลิตในทาง การค้าเพราะได้ผลผลิตปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ตัวอย่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสารประกอบอินคลู

ชันของน้ำมันหอมระเหย เช่นน้ำมันจากอบเชย (cinnamon oil), กานพลู (clove oil), ไทม์ (thyme) และ พืชตระกูล basil ที่มีสารประกอบสำคัญ คือ estragole [13] สำหรับ วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) นั้น พบว่าเหมาะสำหรับใช้กับโมเลกุลที่มีความคงตัวต่อความ ร้อน โดยละลาย CDs และสารที่ต้องการทำสารประกอบ อินคลูชันในน้ำกลั่น จากนั้นทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้ง แบบพ่นฝอยภายใต้อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส และ อัตราเร็วในการป้อนสารละลายที่เหมาะสม วิธีการนี้ถูก นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย ขั้นตอนไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และได้ผลผลิตคุณภาพดี ตัวอย่างการทำแห้งแบบพ่นฝอยในสารประกอบอินคลูชัน เช่นการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำมันหอมระเหยจากขิง [14]

การตรวจสอบการเกิดสารประกอบอินคลูชัน

หลังจากที่ได้ผลผลิตเป็นสารประกอบอินคลูชัน แล้ว สามารถยืนยันการเกิดสารประกอบโดยมีวิธีการ ตรวจสอบที่หลากหลาย ได้แก่

● Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-vis)

เป็นวิธีศึกษาการเกิดสารประกอบอินคลูชันเบื้องต้น ที่ใช้ UV-vis spectrophotometer เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแสง หรือ รังสี ในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสูงสุด ที่สุด จากการเกิดสารประกอบอินคลูชันของ CDs แต่ละชนิด และ ความเข้มข้นของสารที่แตกต่างกัน ตัวอย่างการใช้ UV-vis ตรวจสอบการเกิดอินคลูชัน เช่น เมื่อเป็นสารละลาย β -caryophyllene ตัวเดียว จะเห็น peak ของ UV-vis ที่ความ ยาวคลื่น 205 nm แต่เมื่อเกิดอินคลูชันพบว่า peak ที่ความ ยาวคลื่น 205 nm หายไป ซึ่งเหมือนกับสารละลายของ CDs เพียงอย่างเดียว แสดงว่าเกิดอินคลูชันอย่างสมบูรณ์ [15]

● Phase solubility เป็นวิธีการตรวจสอบผลผลิต ที่ได้ว่าเป็นสารประกอบอินคลูชันจริง หรือเป็นเพียง physical mixture ของสารชนิดนั้นกับ CDs เมื่ออยู่ใน รูปของแข็งที่เป็นผลึก โดยการนำสารประกอบมาละลาย น้ำ ซึ่งจะจำแนกการละลายของสารจากรูปแบบ phase solubility ของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารและ CDs ใน สารละลายใน ดังนี้ (Figure 4)

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

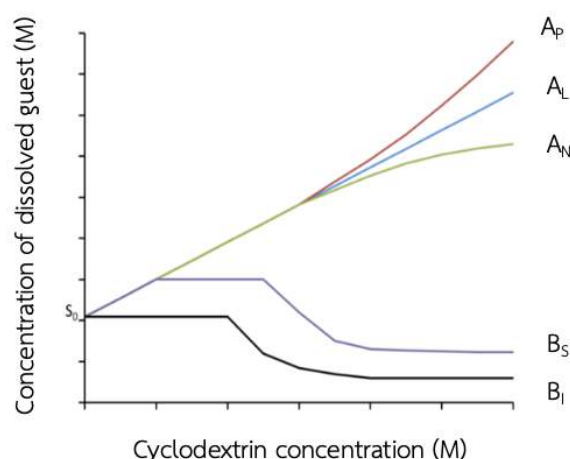


Figure 4 Phase solubility profiles and classification of inclusion complexes [16]

เมื่อ A-type curves แสดงถึงการรวมตัวของสารประกอบอินคลูชันที่มีความสามารถในการละลายได้ดี

A_L -type เป็น linear enhance ของความสามารถในการละลายของสารเนื่องจากความเข้มข้นของ CDs

A_P -type เป็น positive deviating isotherms

A_N -type เป็น negative deviating isotherm

B-type curves แสดงถึงการรวมตัวของสารประกอบอินคลูชันที่มีความสามารถในการละลายต่ำ

B_S -type แสดงถึงสารประกอบที่มีข้อจำกัดในการละลาย

B_I -type แสดงถึงการรวมตัวของสารประกอบที่ไม่มีความสามารถในการละลาย

เมื่อได้ linear portion ของ phase solubility diagram แล้วสามารถหาค่าคงที่ความคงตัวของสารประกอบอินคลูชัน (K_s) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$K_s = K_r / K_d = [\text{สารประกอบอินคลูชัน}] / [\text{CDs}][\text{สาร}]$$

โดย K_r คือ อัตราคงที่ของการกลับมารวมตัวกัน หาได้จาก slope ของกราฟ มีหน่วยเป็น $M^{-1} s^{-1}$

K_d คือ อัตราคงที่การแยกตัวออกจากกัน หาได้จากผลคูณของ Intercept กับ 1-slope มีหน่วยเป็น s^{-1}

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ความคงตัวของสารประกอบ (K_s) พบว่าค่า K_s ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานอยู่

ในช่วง 100-5,000 ลิตร/โมล หากสารประกอบที่มีค่า K_s ต่ำกว่า 100 ลิตร/โมล จะมีผลทำให้เกิดอันตรกิริยาอย่างอ่อนระหว่าง CDs และโมเลกุลสาร และจะทำให้เกิดการปลดปล่อยของโมเลกุลสารได้ง่ายในทางกลับกันหากค่า K_s มีค่าสูงกว่า 5,000 ลิตร/โมล จะเกิดการจับกันของ CDs ต่อโมเลกุลสารอย่างแน่นและคงตัวมาก ทำให้ไม่สามารถปลดปล่อยสารนั้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสมบัติข้อนี้สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาการควบคุมการปลดปล่อยของสารประกอบอินคลูชันได้ กล่าวคือ อาจควบคุมให้มีการปลดปล่อยช้าลงซึ่งเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง ตัวอย่างเช่น หากสารประกอบอินคลูชันจากน้ำมันมะกอกที่มีค่าการละลายน้ำของ oleuropein เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงที่แสดงลักษณะของ AL -type ตาม phase solubility diagram นั้นหมายความว่า oleuropein ในสารประกอบมีความคงตัวและมีความสามารถในการละลายสูงขึ้นเมื่อจับกับ CDs [17]

● Differential scanning calorimetry (DSC)

เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบความคงตัวต่อความร้อน (thermal stability) ของสารและสารประกอบอินคลูชันที่จุดหลอมเหลวหรือจุดเดือด โดยพิจารณา endothermic หรือ exothermic peak ที่พบจากสารแต่จะไม่ปรากฏในสารประกอบอินคลูชัน จากการศึกษพบว่ามีการใช้ DSC ในการตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชัน β -CD กับ น้ำมันหอมระเหยจากอบเชยและกานพลู ที่มี trans-

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

cinnamaldehyde และ eugenol เป็นส่วนประกอบ เมื่อเกิดการออกซิเดชันจะปรากฏ exothermic peak ที่อุณหภูมิแตกต่างกันกับสารประกอบอินคลูชัน แสดงให้เห็นว่าสารนั้นถูกจับเข้าไปที่โพรงภายในของ β -CD เนื่องจากไม่พบ exothermic peak ของสารประกอบที่อุณหภูมิเดียวกันกับ trans-cinnamaldehyde และ eugenol [18]

● **X-ray diffraction (XRD)** เป็นเทคนิคที่เหมาะสมต่อการตรวจสอบสารประกอบอินคลูชันของน้ำมันหอมระเหยอย่างมาก เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยที่เป็นของเหลวนั้นจะไม่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสง แต่ถ้าเป็นสารประกอบอินคลูชันของ CDs จะทำให้เกิดความแตกต่างของ diffractogram แสดงให้เห็นถึงการเกิดสารประกอบของ CDs กับ น้ำมันหอมระเหย ตัวอย่างการใช้เทคนิคนี้กับสารประกอบอินคลูชันของน้ำมันหอมระเหยคาโมมายล์ (camomile) และ ออริกาโน (oregano) รวมถึงสารประกอบอินคลูชัน β -CD กับน้ำมันหอมระเหยจากขิง ที่มีตำแหน่งของ diffraction peak แตกต่างกับ

น้ำมันหอมระเหยจากขิงอย่างมีนัยสำคัญ [14]

การใช้สารประกอบอินคลูชัน

การเกิดสารประกอบอินคลูชันจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหอมระเหย โดย CDs จะทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยเอาไว้ในโพรงภายใน มีผลทำให้โมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยเกิดการเปลี่ยนแปลงเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุล CDs ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ถูกใช้ประโยชน์ในอาหารและเครื่องสำอางหลากหลาย Table 2 แสดงถึงการปรับปรุงสมบัติของน้ำมันหอมระเหยเมื่อเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชัน โดย CDs ทำหน้าที่หลักสำคัญ คือ เป็นตัวพาสารที่ถูกจับไว้ให้มีความคงตัวเพิ่มขึ้นจากปัจจัยภายนอก เช่น ออกซิเจน แสง และความร้อน ทำให้ไม่เกิดการออกซิเดชันและการระเหยของสารระเหยให้กลิ่น เพิ่มความสามารถในละลาย ปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัส ยืดอายุของผลิตภัณฑ์และควบคุมการปลดปล่อยได้

Table 2. Examples of improved properties of essential oil after encapsulation with cyclodextrins

Essential oil	Cyclodextrins	Properties	References
Cinnamon oil	β -CD	Stability	[19,22]
Jasmin oil	β -CD	Stability	[19]
Peppermint oil	β -CD	Stability	[19]
Caraway oil	β -CD	Stability	[20,32]
Thymol, Eugenol and Carvacrol	β -CD	Stability, Solubility	[21]
Clove oil	β -CD	Stability	[22]
Lavender oil	α , β , γ , HP- β -CD	Stability	[23]
Olive leaf oil	β -CD	Stability, Solubility	[17]
Basil oil	α , β , γ , HP- β -CD	Stability, Controlled release	[13]
Tarragon oils	α , β , γ , HP- β -CD	Stability, Controlled release	[13]
Lemongrass Oil	α , β , γ , HP- β -CD	Stability, Controlled release	[24]
Carvacrol, Eugenol, Linalool and 2-pentanoylfuran	α , β , HP- β -CD	Solubility	[25]
p-Cymene, Thymol, Carvacrol	β -CD	Stability	[26]

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

การเพิ่มความคงตัวของน้ำมันหอมระเหยด้วยอินคลูชันคอมเพล็กซ์ของไซโคลเดกซ์ทริน

การเพิ่มความคงตัวของน้ำมันหอมระเหยโดยการเกิดสารประกอบอินคลูชันเกิดจากการที่น้ำมันหอมระเหยเข้าไปอยู่ในโพรงของไซโคลเดกซ์ทริน ทำให้ไม่สามารถสัมผัสกับสิ่งที่จะทำให้ น้ำมันหอมระเหยเสื่อมเสียได้โดยตรง จึงทำให้น้ำมันหอมระเหยมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งการทำอินคลูชันคอมเพล็กซ์มีข้อดีหลายประการ ได้แก่

● ป้องกันการสูญเสียสารให้กลิ่นระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

น้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากพืชส่วนใหญ่จะเกิดการสูญเสียได้ง่ายเนื่องจากอยู่ในรูปของสารระเหยที่ละลายในน้ำมัน โดยน้ำมันหอมระเหยจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำมากๆ ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส ทำให้สารในน้ำมันหอมระเหยบางประเภทเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เช่น สารระเหยให้กลิ่น linalool ในน้ำมันดอกคาโมมายล์และ camphor จากดอกลาเวนเดอร์จะเกิดการสลายตัวระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งได้ง่าย แต่เมื่อเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชันของ β -CD มีรายงานว่าสามารถป้องกันการสลายของสารให้กลิ่นนั้นๆ ได้ดีมากขึ้น [23]

● การปรับปรุงความคงตัวของ D-carvone เพื่อใช้เป็นตัวยับยั้งการงอกของต้นอ่อนพืช

มันฝรั่งจัดเป็นพืชอาหารสำคัญของชาวยุโรป โดยจะเก็บเกี่ยวเป็นหัวสดเพื่อรอการบริโภค ซึ่งแท้จริงแล้วหัวมันฝรั่งคือลำต้นใต้ดิน (tuber) เมื่อมีสภาพความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการงอกของต้นอ่อนทำให้สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการลง D-carvone เป็นสารหอมระเหยที่สกัดได้จากเมล็ดยี่หระ จัดอยู่ในกลุ่มของ monoterpene ถูกใช้เป็นสารยับยั้งการงอกของต้นอ่อนของมันฝรั่งได้ดี แต่ความเข้มข้นของ D-carvone จะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่นำไปใช้ยับยั้งการงอกของต้นอ่อนมันฝรั่ง แต่เมื่อนำมาเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชันกับ β -CD จะช่วยทำให้การสลายตัวของ D-carvone เมื่อนำไปใช้กับมันฝรั่งแช่ลาง [32]

● ป้องกันการสูญเสียของสารระเหยให้กลิ่นในกลุ่ม E-citral จากความร้อนและรังสี

คุณภาพของน้ำมันหอมระเหยหลังจากที่สกัดออกมาจากพืชนั้นจะคงทนหรือไม่ ขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บรักษา รวมถึงปัจจัยภายนอก ได้แก่ ความร้อน แสง และรังสี เช่น รังสี UVA UVB และ UVC ที่เป็นตัวกลางสำคัญทำให้โครงสร้างของสารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันหอมระเหยเปลี่ยนแปลง ในน้ำมันหอมระเหยจากโหระพา (basil oil) ตะไคร้ (lemongrass oil) และทาร์รากอน (tarragon oil) จะมี citral isomer เป็นองค์ประกอบ จากการศึกษาพบว่าการเกิดสารประกอบอินคลูชันของ *trans*-citral กับ β -CD จะช่วยทำให้ *trans*-citral มีความคงตัวมากขึ้นเมื่อผ่านความร้อนหรือเก็บรักษาไว้ในสภาวะที่มีแสง [13,24]

● ควบคุมการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันหอมระเหย

น้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากพืชเป็นสารอินทรีย์ที่มีความคงตัวต่ำ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ง่ายทั้งในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic reaction) และไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic reaction) โดยสารหอมระเหยในน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากอบเชยและกานพลูจะประกอบไปด้วย *trans*-cinnamaldehyde และ eugenol รวมถึง oleuropein ซึ่งสารให้กลิ่นหลักในน้ำมันมะกอก (olive oil) มักเกิดการออกซิเดชันได้ง่าย จากการศึกษาพบว่าการเกิดสารประกอบอินคลูชันระหว่างสารหอมระเหยข้างต้นกับ β -CD จะช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน (auto oxidation) ของน้ำมันหอมระเหยลง เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง oxidative differential scanning calorimetry [17,19,22]

● ปรับปรุงสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ ถูกสร้างขึ้นมาโดยสิ่งมีชีวิตอยู่ตลอดเวลาจากกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction reaction) มีผลต่อการทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์จนเกิดการรั่วไหลของประจุและเกิดการเสียสภาพของเซลล์ในที่สุด ถึงแม้ว่าในธรรมชาติจะมีกระบวนการต้านอนุมูลอิสระ แต่หากเกิดการออกซิเดชันอาจมีผลทำให้สารต้านอนุมูลอิสระไม่เพียงพอ จึงควรต้อง

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

บริโภคน้ำมันที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเข้าไปเพื่อช่วยลดการเสื่อมของเซลล์อีกทางหนึ่ง โดยสารสกัดจากน้ำมันหอมระเหยของพืชหลายชนิดมีฤทธิ์ดังกล่าว จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม และยา โดยพัฒนาให้สารต้านอนุมูลอิสระนี้คงประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น β -caryophyllene เป็นองค์ประกอบสารให้กลิ่นหลักในน้ำมันหอมระเหยพริกไทยดำ (black pepper oil) carvacrol และ thymol ในน้ำมันหอมระเหยจากดอกเยอร์วอร์ (yarow oil) จะมีคุณสมบัติในการป้องกันและกำจัดอนุมูลอิสระได้ดีขึ้นเมื่อเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชันระหว่างสารหอมระเหยกับ β -CD

● ปรับปรุงสมบัติในการต้านการเจริญของจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์เป็นสาเหตุที่ทำให้ลายเซลล์และก่อให้เกิดโรค ได้มีการนำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากออริกาน มี phenolic monoterpenoids เป็นสารประกอบหลัก ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชันกับ β -CD [27]

การปรับปรุงคุณสมบัติด้านการละลายของน้ำมันหอมระเหย

น้ำมันหอมระเหยส่วนใหญ่มักจะละลายในน้ำมันที่มีความเป็นขี้ดต่ำ CDs เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลของกลูโคสที่มีโครงสร้างเป็นรูปกรวยกัน ตัดที่ด้านนอกมีสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นจึงสามารถละลายน้ำได้ ส่วนผิวภายในโพรงนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงจับกับสารประเภทที่ไม่ชอบน้ำได้ดี เช่น น้ำมันหอมระเหย ทั้งนี้ต้องเลือกขนาดของโมเลกุลสารที่จะนำมาเกิดสารประกอบอินคลูชันให้เหมาะสมกับขนาดของ CDs ที่สารนั้นเข้าไปจับด้วย ยกตัวอย่างสารในน้ำมันหอมระเหยที่ประกอบด้วย carvacrol, eugenol, linalool, 2-pentanol, furan และ thymol เมื่อเกิดสารประกอบอินคลูชันกับ CDs พบว่าผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการดูดน้ำและความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การศึกษา phase solubility พบว่าการเกิดสารประกอบอินคลูชันของน้ำมันหอมระเหยจากใบมะกอกกับ β -CD ที่เพิ่มความสามารถในการละลาย

น้ำของสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยได้มากกว่า 150% จึงสามารถนำสารประกอบอินคลูชันนี้ไปใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ น้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในสถานะของเหลว [17,25]

การควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญในน้ำมันหอมระเหย

การปลดปล่อยสารสำคัญส่วนใหญ่เป็นสารระเหยให้กลิ่นที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหย จะเกิดขึ้นช้า หรือ เร็ว ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารหอมระเหยนั่นและปัจจัยภายนอกที่เข้ามากระตุ้น การควบคุมสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ เช่น ต้องการให้สารหอมระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อได้รับความร้อน หรือในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการควบคุมการปลดปล่อยให้เกิดอย่างคงที่เมื่ออาหารถูกเปิดออกสู่สภาวะแวดล้อม โดยมีรายงานว่า สารประกอบอินคลูชันมีสมบัติในการกักเก็บสารให้กลิ่นเอาไว้ในโครงสร้างเป็นระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งจะปลดปล่อยกลิ่นรสออกมาได้ภายในช่องปากในภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น [28] จากการศึกษาสารประกอบอินคลูชัน CDs ของ estragole ในน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาและทาร์รากอน เกิดการปลดปล่อยสารให้กลิ่นอย่างช้า ๆ หลังจากช่วง 2 ชั่วโมง และพบว่ายังคงเหลือ estragole อยู่ประมาณ 37-44% ขึ้นอยู่กับชนิดของไซโคลเดกซ์ทรินที่ใช้ ในขณะที่ estragole ในน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาและทาร์รากอน ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว ประมาณ 98% ภายใน 1 ชั่วโมง จึงสามารถบอกได้ว่าสารประกอบอินคลูชันมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นได้ นอกจากนี้สารประกอบอินคลูชันของ citral isomers ในน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ รวมถึงน้ำมันหอมระเหยจากหอม (onion oil) และน้ำมันหอมระเหยจากกระเทียม (garlic oil) พบว่ามีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยของสารให้กลิ่นได้ดีด้วยเช่นกัน ในขณะที่ปัญหาเรื่องการปลดปล่อยกลิ่นรสนี้ สอดคล้องกับการศึกษาการจับกันระหว่างสารให้กลิ่นรสและโปรตีน (flavor binding protein) โดยมีรูปแบบของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible) และผันกลับไม่ได้ (irreversible) กล่าวคือ สารให้กลิ่นรสจะจับกับโปรตีนในอาหาร หากเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ จะเกิดการจับกันด้วยพันธะที่

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

แข็งแรงไม่มากนัก เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรโฟบิก และพันธะไอออนิก แต่หากเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้จะเกิดการจับกันด้วยพันธะที่แข็งแรง เช่น พันธะโควาเลนต์ เกิดจากหมู่คาร์บอนิลของสารให้กลิ่นและหมู่เอมีนในโมเลกุลของโปรตีนที่มาจับกัน ส่งผลให้อาจไม่เหลือสารให้กลิ่นรสอิสระ ทำให้กลิ่นรสในอาหารนั้นจางลงหรือไม่ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งมีผลต่อกลิ่นรสโดยรวมของอาหาร ดังนั้นจึงต้องมีการดัดแปรโครงสร้างของโปรตีน จากการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างโปรตีนด้วยวิธี ดีแอมิเนชัน (deamination) โดยกลุ่มวิจัยของ Suppavorasatit และคณะ พบว่ากลิ่นรสที่มีสารประกอบเป็นหมู่คาร์บอนิล เมื่อเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนถั่วเหลือง นมถั่วเหลือง และโปรตีนมะพร้าวที่ถูกดัดแปรแล้ว ทำให้ความแข็งแรงของพันธะลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แสดงลักษณะของกลิ่นรสได้มากขึ้น [29-31]

สรุป

การเกิดสารประกอบอินทรีย์ชั้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของสารระเหยให้กลิ่นของน้ำมันหอมระเหย โดย CDs จะทำหน้าที่กักเก็บสารเอาไว้ในโพรงภายใน มีผลทำให้โมเลกุลของสารระเหยให้กลิ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุล CDs ซึ่งทำหน้าที่หลักสำคัญคือเป็นตัวพาสารที่ถูกจับไว้ให้มีความคงตัวเพิ่มขึ้นจากปัจจัยภายนอก เช่น ออกซิเจน ความชื้น แสง ความร้อน ทำให้ไม่เกิดการออกซิเดชันและการระเหยของสารระเหย ช่วยเพิ่มความสามารถในละลาย และควบคุมการปลดปล่อยของสารระเหยให้กลิ่นนั้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Raut, J. S., and Karuppayil, S. M. (2014). A status review on the medicinal properties of essential oils. *Industrial Crops and Products*. 62: 250-264.
- [2] Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., and Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils a review. *Food Chemistry*. 110: 446-475.
- [3] Calo, J. R., Crandall, P. G., O'Bryan, C. A., and Ricke, S. C. (2015). Essential oils as antimicrobials in food systems: a review. *Food Control*. 54: 111-119.
- [4] Del Valle, E. M. M. (2004). Cyclodextrins and their uses: A review. *Process Biochemistry*. 39: 1033-1046.
- [5] Fenyvesi, E., Gruiz, K., Verstichel, S., Wilde, B. De., Leitgib, L., Csabai, K., and Szaniszló, N. (2005). Biodegradation of cyclodextrins in soil. *Chemosphere*. 60: 1001-1008.
- [6] Kfoury, M., Hadaruga, N. G., Hadaruga, D. I., and Fourmentin, S. (2016). Chapter 4; Cyclodextrins as encapsulation material for flavors and aroma. In Grumezescu, A. M. (Ed.) *Encapsulations*. Elsevier Inc. pp. 127-192.
- [7] Connors, K. A. (1997). The stability of cyclodextrin complexes in solution. *Chemical Reviews*. 5: 1325-1357.
- [8] Ponce C. P., Buera, M., and Elizalde, B. (2010). Encapsulation of cinnamon and thyme essential oils components (cinnamaldehyde and thymol) in beta-cyclodextrin: Effect of interactions with water on complex stability. *Journal of Food Engineering*. 99: 70-75.
- [9] Szejtli, J. (1998). Introduction and general overview of cyclodextrin chemistry. *Chemical Reviews*. 98(5): 1743-1753.
- [10] Astray, G., Gonzalez, B. C., Mejuto, J. C., Rial, O. R., and Gandara, S. J. (2009). A review on the use of cyclodextrins in foods. *Food Hydrocolloids*. 23: 1631-1640.
- [11] Abarca, R. L., Rodriguez, F. J., Guarda, A., Galotto, M. J., and Bruna, J. E. (2016). Characterization

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

- of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing an essential oil component. *Food Chemistry*. 196: 968-975.
- [12] Cheirsilp, B., and Rakmai, J. (2016). Inclusion complex formation of cyclodextrin with its guest and their applications. *Biology, Engineering and Medicine*. 2(1): 1-6.
- [13] Kfoury, M., Auezova, L., Ruellan, S., and Greige-Gerges, H. (2015). Complexation of estragole as pure compound and as main component of basil and tarragon essential oil with cyclodextrins. *Carbohydrate polymers*. 118: 156-164.
- [14] Zhang, Y., Zhang, H., Wang, F., and Wang L. (2018). Preparation and Properties of Ginger Essential beta-cyclodextrin/chitosan inclusion complexes. *MDPI*. 8: 305-318.
- [15] Liu, H., Yang, G., Tang, Y., Cao, D., Qi, T. Qi, Y., and Fan, G. (2013). Physicochemical characterization and Pharmacokinetics evaluation of beta-caryophyllene/beta-cyclodextrin inclusion complex. *International Journal of Pharmaceutics*. 450: 304-310.
- [16] Higuchi, T., and Connors, K. A. (1965). Phase solubility techniques. In *Advances in Analytical Chemistry Instrument*; Wiley-Interscience: New York, NY, USA, Volume 4, pp. 56–63.
- [17] Mourtzinou, I., Salta, F., Yannakopoulou, K., Chiou, A., and Karathanos, V. T. (2007). Encapsulation of Olive Leaf Extract in β -Cyclodextrin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55: 8088-8094.
- [18] Marques, H. M. C. (2010). A review on cyclodextrin encapsulation of essential oils and volatiles. *Flavour and Fragrance Journal*. 25: 313-326.
- [19] Szejtli, J., and Szenté, L. (1979). Stabilization of volatile, oxidizable flavour substances by β -cyclodextrin. *Planta Medica*. 36(3): 292–293.
- [20] Partanen, R., Ahro, A., Hakala, M., Kallio, H., and Forssell, P. (2002). Microencapsulation of caraway extract in β -cyclodextrin and modified starches. *European Food Research and Technology*. 214: 242-247.
- [21] Locci, E., Lai, S., Piras, A., Marongiu, B., and Lai, A. (2004). ^{13}C -CPMAS and ^1H -NMR Study of the Inclusion Complexes of β -Cyclodextrin with Carvacrol, Thymol, and Eugenol Prepared in Supercritical Carbon Dioxide. In Smith, R. J. (Ed.) *Chemistry and Biodiversity*. Wiley-VHCA AG. pp. 1241-1400.
- [22] Hill, L. E., Gomes, C., Matthew, T. T. (2013). Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing essential oils (trans-cinnamaldehyde, eugenol, cinnamon bark, and clove bud extracts) for antimicrobial delivery applications. *Food Science and Technology*. 51(1): 86-93.
- [23] Ciobanu, A., Mallard, I., Landy, D., Brabiec, G., Nistorc, D., and Fourmentin, S. (2012). Inclusion interactions of cyclodextrins and crosslinked cyclodextrin polymers with linalool and camphor in *Lavandula angustifolia* essential oil. *Carbohydrate Polymers*. 87: 1963–1970
- [24] Ruktanonchai, U. R., Srinuanhai, W., Saesoo, S., Sramala, I., Puttipipatkachorn, S., and Sootitawatt, A. (2011). Encapsulation of

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330

- citral isomers in extracted lemongrass oil with cyclodextrins: molecular modeling and physicochemical characterizations. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 75(12): 2340-2345.
- [25] Liang, H., Yuan, Q., Vriesekoop, F., and Lv, F. (2012). Effects of cyclodextrins on the antimicrobial activity of plant-derived essential oil compounds. *Food Chemistry*. 135(3): 1020-1027.
- [26] Arana, S. A., Estarron, E. M., Obledo, V. E. N., Padilla, C. E., Silva, V. R., and Lugo, C. E. (2010). Antimicrobial & antioxidant activities of Mexican oregano oil with different composition when microencapsulated in β -CD. *The Society for Applied Microbiology*. 50: 585-590.
- [27] Rakmai, J., Cheirsilp, B., Cid, A., Agrasar, T. A., Mejuto, C. J., and Gandara., S. J. (2018). Chapter 11; Encapsulation of Essential Oils by Cyclodextrins: Characterization and Evaluation. In Arora, P., and Dhingra, N. (Eds.) *A Versatile Ingredient*. IntechOpen. pp. 263-290.
- [28] Rosenberg, M., Kopelman, I. J., and Talmon, Y. (1990) Factors affecting retention in spray-drying microencapsulation of volatile materials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 38: 1288-1294.
- [29] Suppavorasatit, I., De Mejia, E. G., and Cadwallader, K. R. (2011). Optimization of the enzymatic deamidation of soy protein by protein-glutaminase and its effect on the functional properties of the protein. *Journal of Agricultural and Food chemistry*. 59(21): 11621-11628.
- [30] Suppavorasatit, I., Lee, S. Y., and Cadwallader, K. R. (2013). Effect of enzymatic protein deamidation on protein solubility and flavor binding properties of soymilk. *Journal of Food Science*, 78(1): C1-C7.
- [31] Kunarayakul, S., Thaiphanit, S., Anprung, P., and Suppavorasatit, I. (2018). Optimization of coconut protein deamidation using protein-glutaminase and its effect on solubility, emulsification, and foaming properties of the proteins. *Food Hydrocolloid*. 79: 197-207.
- [32] Silva, M. C. E., Galhano, C. I. C., and Silva, A. M. G. M. (2007). A new sprout inhibitor of potato tuber based on carvone/ β -cyclodextrin inclusion compound. In Albrecht, M. (Ed.) *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*. Springer. pp. 121-124.

* Corresponding author e-mail: inthawoot.s@chula.ac.th

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, 10330