

---

# การเตรียมและการประยุกต์ใช้สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสในระบบนำส่งสารสำคัญทางอาหาร

## Preparation and Application of Amylose Inclusion Complexes in Nutrient Delivery System

ธีรรัตน์ อธิโสภณกุล\*

คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Teerarat Itthisoponkul\*

Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University.

---

### บทคัดย่อ

การใช้สารพอลิเมอร์ทางชีวภาพ เช่น สตาร์ช เป็นตัวควบคุมการนำส่งสารที่มีประโยชน์เข้าสู่ร่างกาย เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ สตาร์ชหรือแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสองชนิดคืออะมิโลสซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและอะมิโลเพคตินซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีกิ่ง โมเลกุลของอะมิโลสสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันกับลิแกนด์อื่นๆ ได้โดยเปลี่ยนโครงสร้างเป็น วี-อะมิโลส ในสภาวะที่มีลิแกนด์อยู่ร่วมกับอะมิโลส ลิแกนด์จะเหนี่ยวนำโมเลกุลของอะมิโลสจากที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ เป็นเกลียวเดี่ยว ส่งผลให้โครงสร้างของอะมิโลสมีช่องว่างที่สามารถกักเก็บลิแกนด์ชนิดต่างๆ ได้ เทคนิคดังกล่าวถือเป็นการเอ็นแคปซูลชั้นสารในระดับนาโนเพื่อนำส่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารต้านออกซิเดชัน วิตามิน กรดไขมันจำเป็น เข้าสู่ร่างกายและให้มีการปลดปล่อยไปยังอวัยวะเป้าหมายได้ วี-อะมิโลสสามารถรักษาความคงตัวของสารออกฤทธิ์ทั้งในระหว่างกระบวนการแปรรูป และการเก็บรักษา เนื่องจากมีความทนต่ออุณหภูมิสูง และการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังสามารถนำส่งสารเข้าสู่ร่างกายเพื่อให้มีการปลดปล่อยในระบบทางเดินอาหารได้ การปลดปล่อยโมเลกุลสารออกฤทธิ์จากสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันสามารถทำได้โดยการปรับความชื้น การใช้อุณหภูมิ และการย่อยสลายโดยเอนไซม์แอลฟา อะมิเลส วี-อะมิโลสสามารถใช้เป็นระบบนำส่งสารสำคัญเข้าสู่ร่างกาย หรือใช้เป็นระบบกักเก็บสารให้กลิ่นรสเพื่อให้มีความคงตัวในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา

**คำสำคัญ :** วี-อะมิโลส สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน นาโนเอ็นแคปซูลชั้น ระบบนำส่ง

---

\*E-mail: teerarat@swu.ac.th

The use of biopolymer such as starch for delivery and controlled release of active ingredients is an emerging unique system. Starch is a mixture of two polymers; amylose which is a predominantly linear glucose polymer, and amylopectin which is a branched glucose polymer. Amylose fraction has the ability to form helical inclusion complexes with suitable guest molecules by forming a V-amylose structure. In the presence of ligands, amylose undergoes a conformation change from double helix to a single helix and entrapped ligands inside the helix cavity. Complexation of amylose with active ligand is a nanoencapsulation technique used for the delivery of bioactive compounds such as antioxidants, vitamins and essential fatty acids into the body and to release them to function at target organs. It is suggested that amylose inclusion complexes provide the protection during processing and storage because the complexes are resistant to high temperature and oxidative reaction. Amylose inclusion complexes can be used as a carrier for active substances which are released in the gastrointestinal tract. The release of the complexes can be manipulated by various means such as increasing moisture content, temperature and hydrolysis by alpha amylase enzyme. V-amylose could be used as a delivery system of active ingredients or used for providing the stability of flavour compounds during processing and storage.

**Keywords :** V-amylose, inclusion complexes, nanoencapsulation, delivery system

## บทนำ

ในปัจจุบันรูปแบบการดำเนินชีวิต ตลอดจนพฤติกรรมการบริโภคของคนเราถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโรคอ้วน โรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรค มะเร็ง การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการบริโภคอาหารเสริม สารโภชนเภสัชภัณฑ์ (nutraceuticals) และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compounds) อย่างไรก็ตามการนำสารต่างๆ เหล่านี้ มาใช้ในอาหาร ยังมีข้อจำกัดในด้านความคงตัวของสารในสภาวะต่างๆ ต่ำ ไม่ว่าจะเป็นระหว่างการแปรรูป การเก็บรักษา รวมถึงเมื่อบริโภคเข้าไปในร่างกายก็จะเจอกับสภาวะความเป็นกรดใน กระเพาะอาหาร นอกจากนี้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพส่วนใหญ่จะมี รสชาติขม หรือมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ อันอาจเป็นสาเหตุให้ไม่เป็นที่ ยอมรับของผู้บริโภคเมื่อใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เทคนิคที่สามารถ นำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกัน แพร่หลาย คือ การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพที่บริโภคได้ เช่น สตาร์ช (starch) มาเป็นตัวห่อหุ้ม

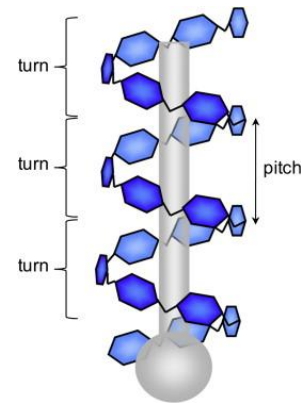
สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพคติน (amylopectin) โมเลกุลอะมิโลสมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วยโมเลกุล ของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะอัลฟาที่ตำแหน่งคาร์บอนอะตอม ที่ 1 และ 4 (1,4  $\alpha$ -D-glucose) ในขณะที่โมเลกุลอะมิโลเพคติน มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีกิ่งก้านแตกแขนงออกไปเป็นจำนวนมาก โดย มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะอัลฟาที่ตำแหน่งคาร์บอนอะตอม ที่ 1 และ 6 (1,6  $\alpha$ -D-glucose) ในปี ค.ศ. 1943 Rundle and Baldwin ค้นพบว่า โมเลกุลของอะมิโลสมีโครงสร้างแบบหมุนเกลียว และมีชื่อเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า วี-อะมิโลส (V-amylose) การที่ตั้งชื่อเรียกนี้ เนื่องจากการค้นพบโครงสร้างดังกล่าวเกิดใน ระหว่างการเจลาติไนเซชันของสตาร์ช ซึ่งในภาษาเยอรมัน คือ “*Verkleisterter Starke*” หรือเรียกย่อว่า V-starch ถึงแม้ว่าใน เวลาต่อมาจะมีการค้นพบเพิ่มเติมว่าลักษณะโครงสร้างดังกล่าว นั้นเกิดได้จากแป้งเจลาติไนซ์ในสภาวะที่มีแอลกอฮอล์อยู่ ชื่อ V-amylose ก็ยังถูกใช้อยู่ตลอดมาจนปัจจุบัน

เนื่องจากสตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่หาได้ง่าย มีราคาถูก มีความปลอดภัยในการใช้เป็นส่วนผสมอาหาร จึงมีการนำสตาร์ชมา ใช้ในเทคนิคเอ็นแคปซูลชัน (encapsulation) เช่น การใช้เป็น สารเคลือบยาเม็ดที่ทำให้แตกตัวในลำไส้ (enteric coating) และ การทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันในระดับโมเลกุล (molecular inclusion complexes) ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ ใช้ความรู้ด้านการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของ

อะมิโลสมาพัฒนาเทคนิคการห่อหุ้มอนุภาคในระดับนาโน (nanoencapsulation) เป็นจำนวนมาก ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันนี้มีศักยภาพสูงในการพัฒนาระบบเอ็นแคปซูลชันในระดับนาโน (Lesmes *et al.*, 2008; Gokmen *et al.*, 2011)

## ลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของ อะมิโลส (amylose-inclusion complexes)

ในสภาวะที่มีลิแกนด์ (ligands) เช่น ไอโอดีน แอลกอฮอล์ และกรดไขมัน อยู่ด้วย สารเหล่านี้จะเหนี่ยวนำโมเลกุลอะมิโลส ให้อยู่ในสภาพสารประกอบเชิงซ้อนที่มีลักษณะเฉพาะ คือ สายโซ่อะมิโลสเดี่ยว จะบิดเป็นเกลียวหมุนแบบหมุนวนซ้าย (left-handed single helix) โดยพันล้อมรอบโมเลกุลลิแกนด์ เอาไว้ (ภาพที่ 1) ทั้งนี้สารลิแกนด์จะหันด้านปลายที่มีขั้ว ออกทางด้านนอกของสายเกลียว และจับส่วนที่ไม่มีขั้วไว้ในช่องว่าง ความยาวของสายอะมิโลสที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของ โมเลกุลของลิแกนด์ เช่น กรดปาล์มมิติก (palmitic acid; C16) ควรใช้อะมิโลสที่มีจำนวนกลูโคส 30-40 โมเลกุล ในขณะที่กรดลอริก (lauric acid; C12) อะมิโลสควรมีจำนวนกลูโคส 20-30 โมเลกุล ดังนั้น ในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันจะต้อง พิจารณาเลือกความยาวของสายอะมิโลสให้เหมาะสมกับชนิดของ ลิแกนด์



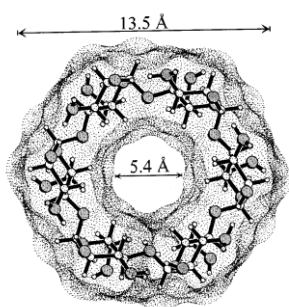
ภาพที่ 1 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารลิแกนด์ (ที่มา: Putseys *et al.*, 2010)

โดยทั่วไปสารประกอบเชิงซ้อน V-amylose มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13.5 อังสตรอม ( $\text{Å}$ ) ขนาดความกว้าง ของช่องว่าง 5.4 อังสตรอม สำหรับเกลียวอะมิโลสที่มีจำนวนกลูโคส 6 โมเลกุล (ภาพที่ 2) ขนาดของเกลียวอะมิโลสสามารถปรับยืดหยุ่น ได้ตามชนิดของลิแกนด์ เราสามารถจัดกลุ่มชนิดของ V-amylose ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของ V-amylose ขนาดของยูนิตเซลล์และชนิดของลิแกนด์

ชื่อเรียก	ที่อยู่ของลิแกนด์	ขนาดของยูนิตเซลล์			ชนิดของลิแกนด์
		a (nm)	b (nm)	c (nm)	
V <sub>h</sub> or V <sub>6l</sub>	อยู่ในช่องว่าง	1.36-1.37	2.37-2.58	0.78-0.81	linear alcohol, fatty acid, aldehyde, emulsifier
V <sub>butanol</sub> or V <sub>6ll</sub>	อยู่ในช่องว่าง และตรงส่วนที่ว่างระหว่างเกลียวอะมิโลส	2.74	2.65	0.80	butanol, acetone, branched alcohol, thymol, linalool, menthone
V <sub>isopropanol</sub> or V <sub>6lll</sub>	อยู่ในช่องว่าง และตรงส่วนที่ว่างระหว่างเกลียวอะมิโลส	2.82	2.93	0.80	Isopropanol

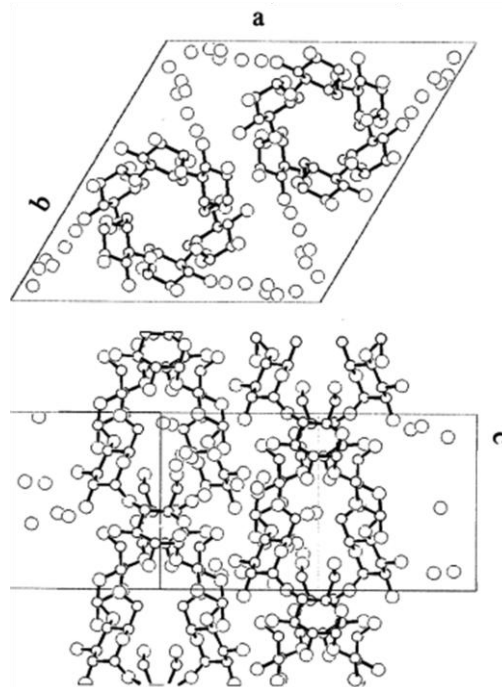
ที่มา : ดัดแปลงจาก Putseys *et al.*, (2010)



ภาพที่ 2 ภาพจำลองภาคตัดขวางลักษณะของ V-amylose (ที่มา: Immel & Lechtenthaler, 2000)

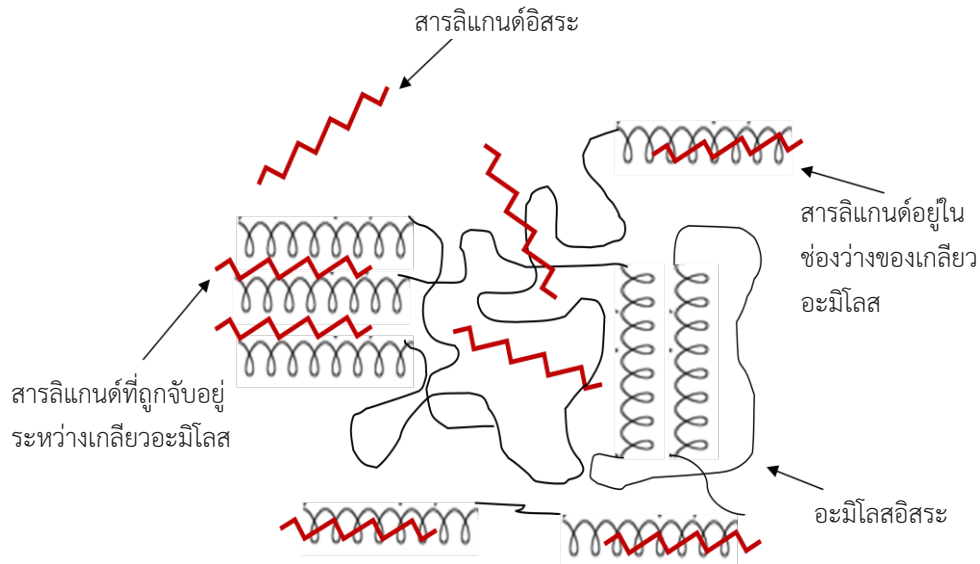
จากตารางที่ 1 การแสดงขนาดของยูนิตเซลล์ (a, b, c) ของ V-amylose แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3 และที่อยู่ของลิแกนด์ใน V-amylose ซึ่งมีทั้งแบบอยู่ในช่องว่าง และตรงส่วนที่ว่างระหว่างเกลียว อะมิโลสแสดงโมเดลดังภาพที่ 4

ในกรณีที่มีลิแกนด์ขนาดโมเลกุลใหญ่ เกลียวอะมิโลสสามารถปรับขยายใหญ่ขึ้น เช่น โมเลกุลของ menthone หรือ fenchone จะเหนี่ยวนำให้เกลียวอะมิโลสมีจำนวนกลูโคส 7 โมเลกุลต่อรอบ (V<sub>7</sub>; ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.7 อังสตรอม) ในขณะที่โมเลกุล naphthol จะเหนี่ยวนำให้เกลียวอะมิโลสมีจำนวนกลูโคส 8 โมเลกุลต่อรอบ (V<sub>8</sub>; ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.2 อังสตรอม) หลังจากที่มีโมเลกุลของอะมิโลสเกิดอินคลูชันกับสารลิแกนด์แล้ว V-amylose หลายๆ โมเลกุลอาจมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกขึ้น ลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส มี 2 แบบ คือ สารประกอบเชิงซ้อนแบบชนิดที่หนึ่ง (type I complexes) ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของ



ภาพที่ 3 ขนาดยูนิตเซลล์ของ V-amylose (ที่มา: ดัดแปลงจาก Takahashi *et al.*, 2004)

V-amylose แบบไม่เป็นระเบียบ (amorphous) และสารประกอบเชิงซ้อนแบบชนิดที่สอง (type II complexes) จะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและอยู่ในรูปผลึก (crystallites) การที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น สภาวะในการทำปฏิกิริยา ชนิดของสารลิแกนด์ ความยาวของสายอะมิโลส เป็นต้น ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวของ V-amylose ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการปลดปล่อยสารสำคัญที่สภาวะต่างกันด้วย



ภาพที่ 4 โมเดลการจัดเรียงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสในรูปแบบที่สารลิแกนด์อยู่ในช่องว่างของอะมิโลส และตรงส่วนที่ว่างระหว่างเกลียวอะมิโลส

#### วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส

การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสสามารถทำได้หลายวิธี โดยหลักการ คือ ให้ความร้อนจนสารละลายสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน สารประกอบเชิงซ้อนจะสามารถเกิดขึ้นได้ทันทีที่ที่แป้งเจลาติไนซ์ จากนั้นจะต้องมีระยะเวลาพอเพียงให้สตาร์ชจับกับโมเลกุลของลิแกนด์ การลดอุณหภูมิหลังการเจลาติไนเซชันของแป้ง เป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน กล่าวคือ หากทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้ V-amylose มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบได้น้อย ลักษณะสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จะเป็นแบบ type I complexes ในขณะที่หากทำการลดอุณหภูมิของระบบลงอย่างช้าๆ จะทำให้ V-amylose สามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้มากขึ้น สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จะอยู่ในรูป type II complexes

สตาร์ชชนิดต่างๆ สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน อย่างไรก็ตามสตาร์ชที่นำมาใช้ควรมีปริมาณอะมิโลสที่เหมาะสม มีกรดไขมันต่ำ เนื่องจากกรดไขมันจะสามารถจับกับอะมิโลสได้ดี ทำให้เกิดการแย่งจับการสารลิแกนด์ที่ต้องการได้ สตาร์ชที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และมีรายงานการนำมาใช้ในการผลิตสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง (Heinemann *et al.*, 2001; Itthisoponkul *et al.*, 2007) เป็นต้น นอกจากนี้การ

ใช้วัตถุดิบตั้งต้นในรูปสตาร์ชแล้ว อะมิโลสที่สกัดจากสตาร์ชเป็นอีกชนิดที่ใช้กันโดยทั่วไป การใช้อะมิโลสบริสุทธิ์นั้นจะให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีความสม่ำเสมอดีกว่าการใช้สตาร์ชที่ยังมีอะมิโลเพคตินเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย

การตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส สามารถตรวจวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคทาง X-ray diffraction (XRD), <sup>13</sup>C Solid state CP/MAS NMR, Differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM) เป็นต้น

#### การควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส

การเข้าใจถึงกลไกการปลดปล่อยสารลิแกนด์จากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส ถือเป็นสิ่งสำคัญเพื่อใช้ในการเตรียมสารในรูปแบบที่สามารถควบคุมให้ปลดปล่อยสารสำคัญในอัตราและปริมาณที่กำหนด รวมถึงสามารถนำสารสำคัญไปยังบริเวณเป้าหมายในร่างกายได้ตามต้องการ ข้อดีของระบบปลดปล่อย (controlled release system) มีหลายด้าน เช่น ควบคุมอัตราเร็วและเวลาในการปลดปล่อยสาร ปกป้องสารสำคัญให้มีความคงตัวต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก ไม่ว่าจะป็นสภาวะระหว่างการแปรรูปหรือการเก็บรักษา สามารถป้องกันการทำปฏิกิริยากันของสารสำคัญหรือสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น ในกรณีของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส การปลดปล่อยสารสำคัญ



สามารถทำได้โดยการใช้ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และเอนไซม์ เช่น การใช้อุณหภูมิระหว่าง 72-129 องศาเซลเซียส จะสามารถปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันนี้มีความคงตัวหลังจากเก็บไว้เป็นเวลาหนึ่งปีที่อุณหภูมิต่ำ (20 องศาเซลเซียส) โดยไม่มีการระเหยของสารให้กลิ่นรสหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น (Nuessli *et al.*, 1997; Heinemann *et al.*, 2001)

กรณีที่ใช้เอนไซม์เป็นปัจจัยในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยเอนไซม์ที่สามารถย่อยสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ คือ เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส ( $\alpha$ -amylase) มีรายงานว่าระดับความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสในปาก (25-200 ยูนิต/กรัม น้ำหนักสด) สามารถย่อยสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสได้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ระดับความเข้มข้นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสในส่วนทางเดินอาหาร (2000 ยูนิต/กรัม น้ำหนักสด) จะสามารถย่อยสารประกอบเชิงซ้อนได้เร็วกว่า (Heinemann *et al.*, 2005) ดังนั้นสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้เป็นระบบนำส่งสารสำคัญที่ต้องการให้มีการปลดปล่อยในส่วนลำไส้ ไม่ว่าจะเป็ นวิตามิน สารต้านอนุมูลอิสระ สารที่มีฤทธิ์ทางยา เป็นต้น

### การประยุกต์ใช้สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสในการนำส่งสารสำคัญทางอาหาร

การใช้ประโยชน์ของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส อาจกล่าวได้ใน 2 ลักษณะใหญ่ คือ

#### 1. ใช้สำหรับรักษาความคงตัวของสารที่มีความไวต่อออกซิเจน รวมทั้งใช้สำหรับควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญเข้าสู่ร่างกาย

ตัวอย่างสารสำคัญที่จะกล่าวในที่นี้ ได้แก่ กรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดหลายพันธะคู่ (polyunsaturated fatty acids, PUFAs) เจนนิสติน (genistine) และ vitamin (วิตามิน) เป็นต้นเป็นที่ทราบกันดีว่า การบริโภคกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีหลายพันธะคู่หรือ PUFAs มีประโยชน์ต่อร่างกายหลายด้าน เช่น การเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย การลดความดันเลือด ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและโรคมะเร็ง เป็นต้น PUFAs ชนิดที่คนทั่วไปรู้จักกันดี คือ โอเมก้า-3 (omega-3) และ โอเมก้า-6 (omega-6) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโดยนับตำแหน่งพันธะคู่ตำแหน่งที่ 3 และ 6 จากปลายด้านหมู่เมทิลตามลำดับ PUFAs ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน แสง และการออกซิเดชันเนื่องจากร่างกายคนเราไม่สามารถสังเคราะห์ PUFAs ขึ้นเองได้ จึงจำเป็นต้องได้รับจากทางอาหาร แต่อย่างไรก็ตาม อาหารทั่วไป

ที่บริโภคกันในแต่ละวันมีปริมาณ PUFAs โดยเฉลี่ยต่ำกว่าปริมาณที่แนะนำให้บริโภค ดังนั้นการเสริม PUFAs ลงในอาหารจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจาก PUFAs นั้นสามารถเสื่อมสลายได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผลิต การเก็บรักษา ตลอดจนการผ่านส่วนของกระเพาะอาหารซึ่งมีความเป็นกรดสูง มีรายงานวิจัยหลายงานที่แสดงให้เห็นว่า สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสสามารถใช้เป็นระบบนาโนในการนำส่งกรดไขมัน เช่น conjugated linoleic acid, docosapentaenoic acid (DPA), docosahexadecanoic acid (DHA) เข้าสู่ร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขนาดของอนุภาคสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มีขนาดในช่วง 100 nm จนถึง 2-3  $\mu$ m และสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวสามารถปลดปล่อยกรดไขมันในส่วนของลำไส้เล็กโดยเอนไซม์อะมิเลสได้ (Lalush *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสกับกรดไขมันชนิดโอเมก้า-3 ไปใช้ในนมผง และพบว่ากรดไขมันมีการเกิดออกซิเดชันได้น้อยลง และยังช่วยลดการเกิดสารเป็นโทษต่อร่างกายที่พบในระหว่างการผลิตนมผง เช่น acrylamide และ hydroxymethyl furfural ด้วย (Gokmen *et al.*, 2011)

วิตามินและสารสำคัญอื่นๆ ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันกับอะมิโลสได้ เช่น วิตามินเอ วิตามินซี ในรูปของ retinyl palmitate และ ascorbyl palmitate ตามลำดับ รวมทั้งสารในกลุ่ม phytosterols ที่พบในพืชและผักต่างๆ (Lay Ma *et al.*, 2011) นอกจากนี้สาร genistein ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของ isoflavones สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ และสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวสามารถทนต่อสภาวะการย่อยสลายด้วยกรด (pH = 1.5) ในกระเพาะอาหารของมนุษย์และถูกปลดปล่อยออกจากระบบ ด้วยการย่อยจากเอนไซม์อะมิเลสที่หลั่งมาจากตับอ่อนซึ่งพบอยู่ในลำไส้ของมนุษย์ เป็นผลทำให้ genistein ถูกปลดปล่อยที่บริเวณลำไส้และมีการดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย (Cohen *et al.*, 2008)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสสามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบเทคโนโลยีในการผลิตอนุภาคนาโนแคปซูลเพื่อพัฒนาระบบนำส่งและควบคุมการปลดปล่อย สารโภชนเภสัชภัณฑ์และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Nutraceuticals and Bioactive compounds) ในการประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและยา โดยอยู่บนพื้นฐานที่ว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะช่วยป้องกันอนุภาคของสารสำคัญไม่ให้เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและยา ตลอดจนไม่เกิดการเสื่อมสลายในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์ และสารสำคัญจะถูกปลดปล่อยออกจากระบบที่บริเวณลำไส้เนื่องจากการย่อยสลายโมเลกุลอะมิโลสด้วยเอนไซม์กลุ่มแอลฟา อะมิเลสที่มีอยู่ในระบบลำไส้ของมนุษย์

## 2. ใช้สำหรับรักษาความคงตัวของสารให้กลิ่นรส

น้ำมันระเหย (volatile oils) และน้ำมันหอมระเหย (essential oils) เป็นสารให้กลิ่นรสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสในกลุ่มดังกล่าวถือเป็นข้อจำกัดเนื่องจากสารในกลุ่มนี้สามารถระเหยได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ทำให้สูญเสียกลิ่นรสและคุณสมบัติทางเคมีของสารเปลี่ยนไป โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้ไซโคเดกตริน (cyclodextrins) เป็นตัวห่อหุ้มสารให้กลิ่นรสในอาหาร เนื่องจากไซโคเดกตรินที่มีลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นวง และมีช่องว่าง ตรงกลางขนาดประมาณ 5-8 อังสตรอม ที่สามารถจับสารให้กลิ่นรสไว้ในโครงสร้างได้ และสารให้กลิ่นรสที่กักเก็บในไซโคเดกตรินจะมีความคงตัวดีทั้งต่ออุณหภูมิและสารเคมีต่างๆ อย่างไรก็ตามไซโคเดกตรินที่มีข้อจำกัด คือ ความสามารถในกักเก็บจะต่ำ ราคาสูง และในบางประเทศกฎหมายยังไม่อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของไซโคเดกตรินกับวี-อะมิโลส จะพบว่า โครงสร้างนั้นคล้ายคลึงกัน คือ มีลักษณะเป็นวง และมีช่องตรงกลางที่สามารถกักเก็บโมเลกุลต่างๆ ได้ แต่สำหรับวี-อะมิโลสนั้นสามารถกักเก็บสารในช่องว่างระหว่างเกลียวอะมิโลสได้เพิ่มขึ้นด้วย จากหลักการดังกล่าวจึงมีรายงานการใช้สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสกับสารให้กลิ่นรสมากมาย โดยสารให้กลิ่นรสที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนควรมีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มีส่วนโครงสร้างที่เป็นสายตรง สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสารให้กลิ่นรสที่ได้มีความคงตัวทั้งในระหว่างการแปรรูป และการเก็บรักษาเนื่องจากสารประกอบดังกล่าวจะสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างสารให้กลิ่นรสที่มีการรายงานว่าสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันกับอะมิโลสได้ เช่น (-)-fenchone, menthone, geraniol, carvone, campher, thymol, lactones, 2-hexanone, hexanol, hexanal, decanal, 1-naphthol, 1-butanol และอื่นๆ (Nuessli *et al.*, 1997; Heinemann *et al.*, 2001; Itthisoponkul *et al.*, 2007)

สำหรับแนวทางในการใช้สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสารให้กลิ่นรสในอาหารนั้น เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นคือ การปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการปลดปล่อย และอาจต้องใช้น้ำเข้ามาช่วยเร่งการปลดปล่อยให้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงอาจประยุกต์ใช้

เทคนิคนี้ในการผลิตอาหารผง หรืออาหารแห้ง ซึ่งในการบริโภคต้องใช้น้ำและให้ความร้อนในการปรุง ทั้งนี้สารให้กลิ่นรสจะมีความคงตัวดีระหว่างการเก็บรักษา และมีการปลดปล่อยออกมาในระหว่างการปรุง อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการใช้อุณหภูมิเป็นปัจจัยในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยสารสำคัญ คือ เมื่อระดับของอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อน โอกาสที่อะมิโลสจะกลับมาเกิดอินคลูชันกับสารสำคัญก็เป็นไปได้เช่นกัน จึงมีข้อเสนอแนะว่า ผลิตภัณฑ์ควรเป็นประเภทที่ใช้บริโภคในขณะร้อน เช่น ซุปผง เครื่องดื่มผง เป็นต้น นอกจากนี้สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันสามารถปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสได้ด้วยเอนไซม์อะมิเลสที่มีอยู่ในปาก แต่เนื่องจากระดับความเข้มข้นของเอนไซม์ในปากนั้นน้อย จึงอาจไม่สามารถย่อยสารประกอบเชิงซ้อนได้ในเวลาสั้นขณะที่ทำการบดเคี้ยวอาหาร ดังนั้นหากเราต้องการให้มีการปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสในปากขณะเคี้ยว จึงควรใช้กับอาหารประเภทที่มีการเคี้ยวเป็นระยะเวลาสั้นๆ เพื่อมีเวลาให้เอนไซม์ทำการย่อยได้มากขึ้น ตัวอย่างอาหารประเภทนี้ เช่น หมากฝรั่ง ลูกอม เป็นต้น

## สรุป

สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส หรือวี-อะมิโลส สามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้สตาโรซหรืออะมิโลสผสมกับสารสำคัญที่ต้องการ จากนั้นทำให้สตาโรซหรืออะมิโลสเกิดเจลาติไนซ์เซชัน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารประกอบ หากใช้อุณหภูมิต่ำจะได้สารประกอบเชิงซ้อนแบบ type I ในขณะที่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงจะได้สารประกอบเชิงซ้อนแบบ type II ซึ่งมีลักษณะการเรียงตัวเป็นระเบียบในลักษณะกึ่งผลึก คุณสมบัติและขนาดโมเลกุลของสารสำคัญที่ใช้ในปฏิกิริยาจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของผลึกสารประกอบที่เกิดขึ้นเช่นกัน สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลสมีคุณสมบัติคงตัวต่อความร้อน และสภาวะความเป็นกรดในกระเพาะอาหาร แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญให้สามารถทำงาน ณ สภาวะที่เหมาะสมได้ โดยใช้ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้นและเอนไซม์แอลฟา อะมิเลสเป็นตัวควบคุม ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของอะมิโลส สามารถใช้เป็นเทคนิคในการพัฒนาอนุภาคโนแคปซูลของสารสำคัญทางอาหาร และสารโภชนเภสัชภัณฑ์ชนิดต่างๆ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะช่วยป้องกันอนุภาคของสารสำคัญไม่ให้เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและยาตลอดจนไม่เกิดการเสื่อมสลายในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา และสารสำคัญจะถูก

ปลดปล่อยออกจากระบบที่บริเวณลำไส้โดยการย่อยสลายโมเลกุลอะมิโลสด้วยเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะมิเลสที่มีอยู่ในระบบร่างกาย

## เอกสารอ้างอิง

- Cohen, R., Orlova, Y., Kovalev, M., Ungar, Y. & Shimoni, E. (2008). Structural and functional properties of amylose complexes with genistein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*, 4212-4218.
- Gokmen, V., Mogol, B.A., Lumaga, R.B., Fogliano, V., Kaplun, Z. & Shimoni, E. (2011). Development of functional bread containing nanoencapsulated omega-3 fatty acids. *Journal of Food Engineering*. *105*, 585-591.
- Heinemann, C, Conde-Petit, B., Nuessli, J. & Escher F. (2001). Evidence of starch inclusion complexation with lactones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *49*, 1370-1376.
- Heinemann, C, Zinsli, M., Renggli, A., Escher, F. & Conde-Petit, B. (2005). Influence of amylose-flavor complexation on build-up and breakdown of starch structures in aqueous food model systems. *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie*, *38*, 885-894.
- Immel, S. & Lichtenthaler, F. W. (2000). The hydrophobic topographies of amylose and its blue iodine complex. *Starch-Stärke*, *52*, 1-8.
- Itthisoponkul, T., Mitchell, J. R., Taylor, A. J. & Farhat, I. A. (2007). Inclusion complexes of tapioca starch with flavour compounds. *Carbohydrate Polymers*, *69*, 106-115.
- Lalush, I., Bar, H., Zakaria, I., Eichler, L., and Shimoni, E. (2005). Utilization of amylose-lipid complexes as molecular nanocapsules for conjugated linoleic acid. *Biomacromolecules*, *6*, 121-130.
- Lay Ma, U.V., Floros, J.D. & Ziegler, G.R. (2011). Formation of inclusion complexes of starch with fatty acid esters of bioactive compounds. *Carbohydrate Polymers*, *83*, 1869-1878.
- Lesmes, U., Barchechath, J. & Shimoni, E. (2008). Continuous dual feed homogenization for the production of starch inclusion complexes for controlled release of nutrients. *Innovative Food Science and Emerging Technology*, *9*, 507-515.
- Nuessli, J., Sigg, B., Conde-Petit, B. & Escher, F. (1997). Characterization of amylose-flavour complexes by DSC and X-ray diffraction. *Food Hydrocolloids*, *11*, 27-34.
- Putseys, J.A., Lamberts, L. & Delcour, J.A. (2010). Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. *Journal of Cereal Science*, *51*, 238-247.
- Rundle, R.E, & Baldwin, R.R. (1943). The configuration of starch and the starch-iodine complex. 1.The dichroism of flow of starch-iodine solutions. *Journal of the American Chemical Society*, *65*, 554-558.
- Takahashi, Y., Kumano, T. & Nishikawa, S. (2004). Crystal structure of B-Amylose. *Macromolecules*, *37*, 6827-6832.