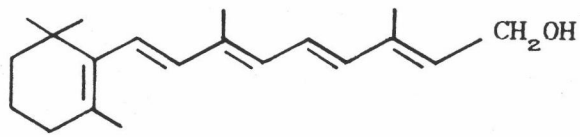
บทที่ 2

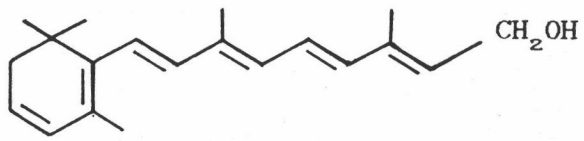
วารสารปริทัศน์

2.1 วิตามินเอ

วิตามินเอเป็นวิตามินที่ละลายในไขมันตัวหนึ่ง เป็นสารอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ไม่อิ่มตัว พบในสัตว์ที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ วิตามินเอหนึ่งหรือเรตินอล (retinol หรือ axerophthol) และวิตามินเอสอง (dehydroretinol) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้(5)



วิตามินเอหนึ่ง



วิตามินเอสอง

วิตามินเอหนึ่งพบมากในตับ นม เนย เนยแข็ง ไข่แดง ส่วนวิตามินเอสองพบมากในตับของปลาน้ำจืด โครงสร้างต่างจากวิตามินเอหนึ่งเพียงแห่งเดียวคือ วิตามินเอสองมีพันธะคู่สองอันใน ring แต่มีคุณค่าทางวิตามินเอเพียงร้อยละ 40 ของวิตามินเอหนึ่งเท่านั้น(6) สากลกำหนดให้ผลิกบริสุทธิ์ของวิตามินเอหนึ่งเป็นมาตรฐานอ้างอิงโดย 1 หน่วยสากล (international unit,I.U.) มีค่าเท่ากับเรตินอล 0.3 ไมโครกรัม วิตามินเออาจอยู่ในอนุพันธ์อื่นหรือไอโซเมอร์อื่น ซึ่งแต่ละรูปจะมีคุณค่าทางวิตามินเอแตกต่างกัน เช่น เรตินาล (retinal), 13-ซิสเรตินอล (13 - cis retinol) มีคุณค่าทางวิตามินเอเพียงร้อยละ 90 และ 75 ตามลำดับ สำหรับอนุพันธ์เอสเทอร์ของเรตินอลจะมีคุณค่าทางวิตามินเอเท่ากับเรตินอล(7) งานวิจัยนี้จะศึกษาการสลายตัวของวิตามินเอในรูปเรตินอล เพราะเป็นรูปที่มีคุณค่าทางวิตามินเอสูงที่สุดและมีมากในตับหมู วิตามินเอที่พบในอาหารประเภทสัตว์มักจะอยู่ในรูปเอสเทอร์ของกรดไขมันโดย

เฉพาะอย่างยิ่งกรดปาล์มิติก (palmitic acid) เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์เป็นเรตินอล แล้วดูดซึมบริเวณลำไส้เล็ก สำหรับ β-caroteneในอาหารประเภทพืช ก็จะเปลี่ยนเป็นเรตินาลแล้วถูกรีดิวส์เป็นเรตินอลบริเวณลำไส้เล็กเช่นกัน(8)

2.1.1 เสถียรภาพของวิตามินเอ

ผลของการแปรรูปอาหารที่มีต่อวิตามิน ขึ้นอยู่กับวิธีการแปรรูป องค์ประกอบเคมีของอาหาร ภาวะแวดล้อม และสมบัติทางเคมีของวิตามิน(9) โดยทั่วไปวิตามินที่ละลายได้ในน้ำจะทนต่อความร้อนน้อยกว่าวิตามินที่ละลายในไขมัน(2)

วิตามินเอมีโครงสร้างเป็น series of conjugated double bonds จึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพบริสุทธิ์ แต่ถ้าอยู่ในอาหารหรืออยู่รวมกับไขมันและมีสารกันหืนธรรมชาติอยู่ด้วยจะมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของวิตามินเอยังขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันด้วยเนื่องจาก peroxide และ free radical ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไขมันสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อเนื่องในวิตามินเอได้ และในทำนองเดียวกันสารกันหืนที่ใช้กับไขมันก็สามารถใช้กับวิตามินเอได้(10)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของวิตามินเอ ได้แก่ ความร้อน เวลา ปริมาณออกซิเจน แสงอัลตราไวโอเลต ภาวะที่เป็นกรดและตัวออกซิไดส์ (oxidizing agents) โดยการสลายตัวจะเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น หรือมีโลหะหนัก เช่น ทองแดง เหล็ก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะมีเสถียรภาพดีในภาวะที่เป็นด่างและปฏิกิริยารีดักชัน วิตามินเอจะสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางวิตามินเอลดลง เช่นที่ pH $\leq$ 4.5 ระหว่างการเก็บรักษา วิตามินเอจะเกิดไอโซเมอไรเซชัน(isomerization)บางส่วนจาก all trans form เป็น cis forms (11) สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน วิตามินเอจะสลายตัวเป็นวิตามินเออิปอกไซด์ (vitamin A epoxide), เรตินาล (retinal) หรือไฮดรอกซิเลทเตดเรตินาล (hydroxylated retinal)(12)

จากรายงานเกี่ยวกับเสถียรภาพของวิตามินเอในอาหารเมื่อผ่านการแปรรูปพบว่า เสถียรภาพของวิตามินเอแตกต่างกันมาก ขึ้นกับประเภทและภาวะการแปรรูปอาหารดังตารางที่ 2.1 นอกจากนั้นยังพบว่า วิตามินเอมีการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งการสูญเสียนี้ขึ้นกับเอนไซม์ water activity ปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การสูญเสียวิตามินเอในอาหารชนิดต่างๆ เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป

ชนิดของอาหาร	ภาวะการแปรรูป	%การสูญเสีย	เอกสารอ้างอิง
fortified cereal product	-	0 - 50	(13,14)
peanut butter	-	0 - 50	(15)
braised liver	internal temp. 77 °C	0 - 10	(16)
liver	minced,cooking	13	(17)
milk	pasteurization, sterilization, spray drying	≃ 0	(18)
milk	UHT and pasteurization	≃ 0	(19)
egg yolk	spray drying	23	(20)
meat	canning	15 - 20	(21)
meat & vegetable	canning	0 - 100	(22)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ภาวะการเก็บรักษาต่อเสถียรภาพของวิตามินเอในอาหาร (11)

ผลิตภัณฑ์	ภาวะการเก็บ	ร้อยละของวิตามินที่เหลือ
butter	12 months, 5 °C	66 - 98
	5 months, 28 °C	64 - 68
margarine	6 months, 5 °C	89 - 100
	6 months, 23 °C	83 - 100
nonfat dry milk	3 months, 37 °C	94 - 100
	12 months, 23 °C	69 - 89
fortified cereal	6 months, 23 °C	83
fortified potato chips	2 months, 23 °C	100

2.1.2 <u>การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเอ</u>

การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเอมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีหลักการที่แตกต่างกัน เช่น Colorimetric Method เป็นปฏิกิริยาการเกิดสี (color reaction) ระหว่างวิตามินเอกับ lewis acid เช่น trichloroacetic acid, antimony pentachloride, ferric chloride, ferrous sulphate และ glycerol dichlorohydrin แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของวิตามินเอ(23,24) การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ต้องผ่านขั้นตอนของโครมาโทกราฟีเพื่อแยกวิตามินเอจากสารรบกวน lewis acid ที่นิยมใช้มากคือ antimony trichloride ($SbCl_3$) เรียกวิธีนี้ว่า Carr-Price Method วิธีนี้เหมาะกับตัวอย่างแทบทุกชนิด เช่น เนย เนยแข็ง มาการีน ยา และนม แต่มีข้อเสียคือ

แอนติโมนีไตรคลอไรด์มีความไวต่อความชื้นสูงทำให้สารละลายสีน้ำเงินชุ่น สารเคมีตัวอื่นได้แก่ trifluoroacetic acid และ trichloroacetic acid(25) มีข้อได้เปรียบ Carr -Price Method คือสารละลายสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นจะถูกรบกวนจากความชื้นน้อยกว่ามาก เครื่องแก้วและเซลที่ใช้ในการทดลองนั้นทำความสะอาดได้ง่ายกว่าเมื่อใช้แอนติโมนีไตรคลอไรด์ (26) Ultraviolet Absorption Method เป็นวิธีวิเคราะห์วิตามินเอโดยอาศัยสมบัติเฉพาะในการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตของเรตินอลและอนุพันธ์ สำหรับ all trans retinol ใน isopropanol จะดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 325 นาโนเมตร(23,24) วิธีนี้เหมาะกับตัวอย่างที่มีวิตามินเอสูงและมีสิ่งรบกวนต่ำ เช่น วิตามินรวม น้ำมันตับปลา(25) ในตัวอย่างที่มีวิตามินอีต้องผ่านขั้นตอน hydrogenation ด้วย(27) นอกจากนี้ยังอาศัยสมบัติการเรืองแสงที่เฉพาะตัวของวิตามินเอในการหาปริมาณเรียกวิธีนี้ว่า Fluorometric Method โดยความยาว-คลื่นในการกระตุ้นเท่ากับ 330 นาโนเมตร ความยาวคลื่นในการปล่อยพลังงานเท่ากับ 480 นาโนเมตร วิธีนี้มีความจำเพาะมากกว่าการวัดการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต(25) แต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงและมีสารรบกวนมาก เช่น อาหารนมหรืออาหารเด็กอ่อนที่แต่งกลิ่นรส เพราะโมเลกุลของตัวอย่างจะดูดกลืนแสงกันเองทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดไป ตัวอย่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์โดยวิธีนี้ ได้แก่ น้ำนม นมผง และอาหารลดความอ้วน(19) วิธีที่ใหม่ที่สุดในการวิเคราะห์วิตามินเอได้แก่ High Performance Liquid Chromatographic Technique เป็นวิธีที่มีข้อได้เปรียบหลายอย่างคือ ความจำเพาะและความไวสูง รวดเร็ว สามารถวิเคราะห์ได้แม้มีปริมาณน้อย ทำให้ไม่เปลืองสารเคมี ทั้งยังสามารถแยกไอโซ-เมอร์ต่าง ๆ ได้ชัดเจนและถูกต้อง(25,28) ใช้กันมากในการวิเคราะห์วิตามินในยาและอาหาร (25) ขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วย การเตรียมตัวอย่าง และการหาปริมาณโดย High Performance Liquid Chromatography ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย alkali hydrolysis เพื่อย่อยและเปลี่ยนรูปเอสเทอร์เป็นแอลกอฮอล์ และสกัดวิตามินเอด้วยตัวทำละ-ลายที่เหมาะสม(29) หรือแยกโดยการตกตะกอนด้วยกรดอะซิติก(30) ในการหาปริมาณโดย High Performance Liquid Chromatography นั้น ระบบหรือภาวะในการแยกและวิเคราะห์ปริมาวิตามินเอมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ ได้แก่ Gas Liquid Chromatography และ Bioassay Procedure(23) และวิธีที่ใช้บอกความแตกต่างระหว่างอนุพันธ์และไอโซเมอร์ของวิตามินเอ ได้แก่ Nuclear Magnetic Resonance และ Infrared Spectrophotometry (31)

ตารางที่ 2.3 ภาวะและระบบในการวิเคราะห์วิตามินเอโดย HPLC

คอลัมน์	ตัวทำละลายเคลื่อนที่	ดีเทคเตอร์	เอกสารอ้างอิง
3,3'oxydipropionitrile	n-hexane	UV 254 nm	(32)
corasilII	n-hexane + 0.1%dioxane	UV 254 nm	(32)
Al_2O_3 + 5% water	3% ethanol in benzene	fluorescence (excit.325nm emiss.514nm)	(33)
ODS (10 μm)	acetonitrile : water = 65:35	UV 328 nm	(30)
partisil-5 ODS	96% methanol in water	UV 325 nm	(34)

2.2 <u>ทฤษฎีจลนพลศาสตร์</u> (Kinetic Theory)

การศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสารอาหารนั้น ข้อมูลทางจลนศาสตร์ที่มีความสำคัญ คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยาของการสลายตัว และผลของอุณหภูมิต่อค่าอัตราเร็วคงที่ของปฏิกิริยา(35)

2.2.1 อัตราเร็วของปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ (kinetic reaction rate)

สมการรวมของปฏิกิริยา อาจเขียนในลักษณะสมการมวลสัมพันธ์ ดังนี้

$$aA + bB + \ldots + nN \longrightarrow pP + qQ + \ldots$$

โดยที่ a, b,...,n คือจำนวนโมลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

p, q,... คือจำนวนโมลของสารผลิตผล

A, B,...,N คือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (reactants)

P, Q,... คือสารผลิตผล (products)

อัตราเร็วของปฏิกิริยา (reaction rate) หมายถึงอัตราเร็วของการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาหรือสารผลิตผล สามารถเขียนให้มีความสัมพันธ์กับสมการมวลสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt} = -\frac{a}{b}\frac{dC_B}{dt} = \frac{a}{p}\frac{dC_P}{dt} = \frac{a}{q}\frac{dC_Q}{dt} \qquad (1)$$

ถ้าความเข้มข้นมีหน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หน่วยของอัตราเร็วของปฏิกิริยาคือ โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (mole $cm^{-3}s^{-1}$)

จาก Law of mass action อัตราเร็วของการสลายตัวของสารตั้งต้นที่อุณหภูมิใด ๆ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังด้วยตัวเลขที่แสดงจำนวนโมลของสารตั้งต้นในปฏิกิริยานั้น

$$r_A = \frac{dC_A}{dt} = -k C_A^{a} C_B^{b} \ldots\ldots C_N^{n} \qquad (2)$$

เมื่อ k = ค่าอัตราเร็วคงที่ของปฏิกิริยา (reaction rate constant) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์มูลฐาน (fundamental kinetic parameter) ถ้าค่าอัตราเร็วคงที่ของปฏิกิริยาสูงแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดเร็ว ค่าอัตราเร็วคงที่ของปฏิกิริยาจะแปรผันตามอุณหภูมิ และพบว่าหน่วยของค่าคงที่ขึ้นกับอันดับรวมของปฏิกิริยา

2.2.2 <u>อันดับของปฏิกิริยา</u> (order of reaction)

เป็นกำลังของความเข้มข้นของสารตั้งต้น จากสมการที่ 2 อันดับของปฏิกิริยาคือ ผลบวกของกำลังของความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งหมด ซึ่งจะเท่ากับ a + b + ... + n ค่าอันดับของปฏิกิริยาอาจเป็นเลขจำนวนเต็มหรือเศษส่วนก็ได้(36)

สำหรับการสลายตัวของสารอาหารชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสง pH และออกซิเจน จะมีอัตราเร็วของการสลายตัวซึ่งเขียนแทนด้วยสมการทั่วไปดังนี้

$$\frac{dC_A}{dt} = -k C_A^{n} \qquad (3)$$

เมื่อ C_A = ความเข้มข้นของสาร A

n = อันดับของปฏิกิริยาการสลายตัว

จากสมการที่ 3 เขียนใหม่ได้เป็น

$$C_A^{1-n} - C_{Ao}^{1-n} = (n-1)\,kt \qquad \text{เมื่อ } n \neq 1 \qquad (4)$$

ถ้าปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอาหารดำเนินไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first - order reaction)

$$\ln \frac{C_A}{C_{Ao}} = -kt \qquad \text{เมื่อ } n = 1 \qquad (5)$$

เมื่อ C_{Ao} = ความเข้มข้นของสารอาหาร A ที่เวลาเริ่มต้น

C_A = ความเข้มข้นของสารอาหาร A ที่เวลาใดๆ

เมื่อพลอต $\ln [C_{Ao}/C_A]$ กับเวลา,t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k มีหน่วยเป็น s^{-1}

จากสมการที่ 4 ถ้าปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอาหารดำเนินไปตามปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero - order reaction) หรือ n = 0 จะได้

$$C_A - C_{Ao} = -kt \qquad (6)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $C_{Ao} - C_A$ กับเวลา,t จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ k มีหน่วยเป็น mole $cm^{-3}s^{-1}$

ในทำนองเดียวกันถ้าปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอาหารดำเนินไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง (second - order reaction) จากสมการที่ 4 เมื่อ n = 2 จะได้

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{Ao}} = kt \qquad (7)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $1/C_A - 1/C_{Ao}$ กับเวลา,t จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ k มีหน่วยเป็น $mole^{-1}cm^3\ s^{-1}$

สำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูง แต่ถ้าความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง อัตราเร็วของปฏิกิริยาก็จะขึ้นกับความเข้มข้น แสดงว่าอันดับของปฏิกิริยาก็จะเริ่มสูงขึ้นด้วย(37)

2.2.3 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ทฤษฎีที่อธิบายผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยามีอยู่หลายทฤษฎีด้วยกัน เช่น thermal death time method (TDT), Eyring's theory และ Arrhenius theory โดยวิธีของ TDT ใช้อธิบายผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของการทำลายจุลินทรีย์(38) เมื่อพลอตระหว่าง log(TDT) กับอุณหภูมิจะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -1/z ค่า z จะแสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วการทำลายจุลินทรีย์ สำหรับทฤษฎี Eyring และ Arrhenius ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก สมการอาร์รีเนียสสามารถอธิบายในช่วงอุณหภูมิกว้างกว่า และยังพบว่าเมื่อพลังงานกระตุ้นต่ำกว่า 126 กิโลจูลต่อโมล สมการอาร์รีเนียสใช้ได้ดีกว่าสมการ TDT แต่ถ้าพลังงานกระตุ้นสูงกว่า 126 กิโลจูลต่อโมลสมการทั้งสองใช้ได้เหมือน ๆ กัน(39) ข้อได้เปรียบของสมการอาร์รีเนียสอีกอย่างคือ สามารถ extrapolate ได้เพราะในช่วงอุณหภูมิสูงกราฟยังคงเป็นเส้นตรงในขณะที่สมการ TDT จะไม่เป็นเส้นตรง(40)

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้สมการอาร์รีเนียสในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของวิตามินเอเนื่องจากเป็นทฤษฎีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$k = A e^{-Ea/RT} \qquad (8)$$

เมื่อ A = แฟคเตอร์แห่งความถี่ (frequency factor)

Ea = พลังงานกระตุ้น (activation energy)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

จากสมการ (8) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT} \qquad (9)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง ln k กับ 1/T จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ -Ea/R ทำให้คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้

2.3 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอ

การสลายตัวของวิตามินเอในพืช (คาโรตินอยด์) สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของอาหาร กระบวนการแปรรูปและภาวะการเก็บ ดังตารางที่ 2.4

สำหรับวิตามินเอ(เรตินอล)มีผู้ศึกษาในวิตามินรวม (liquid multivitamin preparations) เพื่อทำนายเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในตลาด โดย extrapolate ค่า k จากกราฟอาร์รีเนียสในช่วงอุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ศึกษาประกอบด้วย thiamine hydrochloride, vitamin B_6 hydrochloride, nicotinamide, ascorbic acid, riboflavin, folic acid, d-pantothenyl alcohol, vitamin B_{12}, vitamin A palmitate และ vitamin D_3 นอกจากนั้นยังมีน้ำตาล แอลกอฮอล์ และ thickening agent วิตามินรวมมี pH 3.2 พบว่าการสลายตัวในช่วงแรก อธิบายโดย

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอ (3)

	apricots	pea,alaska	carrot	
general	canned	canned	5% water and store in air	5% water and store in only 2% O_2
pH	natural	natural	natural	natural
temperature range($^{\circ}C$)	10 to 27	10 to 27	-18 to 20	-18 to 20
$k_{20\cdot C}(min)^{-1}$	2.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	1.6×10^{-6}
Ea(kJ $mole^{-1}$)	45	41	79	79

pseudo zero order reaction มีค่า k ที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 97.05, 317.05 และ 777.0 หน่วยยูเอสพีต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน (U.S.P.unit cm^{-3} day^{-1}) ตามลำดับ ค่า Ea เท่ากับ 95.82 กิโลจูลต่อโมล ช่วงต่อมาอธิบายได้โดย pseudo first order reaction มีค่า k ที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3.18×10^{-2} และ 6.03×10^{-2}ต่อวัน ตามลำดับ ค่า Ea เท่ากับ 61.09 กิโลจูลต่อโมล นอกจากนั้นยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงการสลายตัวมีแนวโน้มที่จะอธิบายโดย zero order reaction มากขึ้น (37) ต่อมามีผู้ศึกษาในวิตามินรวม (multivitamin tablets) ซึ่งประกอบด้วย vitamin A, vitamin D, ascorbic acid, thiamine, riboflavin, niacinamide, pyridoxine, cyanocobalamin และ pantothenic acid โดยศึกษาในช่วง 40-55 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวสามารถอธิบายโดย pseudo first order reaction มีค่า k ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.00×10^{-3}- 7.44×10^{-3}ต่อวัน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3.06×10^{-3}- 4.07×10^{-2}ต่อวันขึ้นอยู่กับปริมาณขององค์ประกอบแต่ละตัว ค่า Ea

เท่ากับ 117.58 กิโลจูลต่อโมล(41) จะเห็นได้ว่าค่า k และ Ea ของการสลายตัวใน liquid multivitamin preparations และ multivitamin tablets มีความแตกต่างกันเนื่องจากมีองค์ประกอบ ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบและลักษณะปรากฏแตกต่างกัน แต่การสลายตัวมีลักษณะเป็น pseudo order เหมือนกัน การศึกษาเสถียรภาพของวิตามินเอในตัวอย่างยามักศึกษาที่อุณหภูมิต่ำ เพราะมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอายุของยาในตลาด หรือเพื่อกำหนดวันหมดอายุของยา แต่สำหรับตัวอย่างอาหารมักศึกษาที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน เช่น ศึกษาการสลายตัวของวิตามินเอเนื่องจากความร้อนใน ghee พบว่าการสลายตัวสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ทั้งที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราเร็ว-คงที่การสลายตัวเท่ากับ 109 x 10^{-5}ต่อวินาที และ 1870 x 10^{-5}ต่อวินาที ตามลำดับ(42) ในตัวอย่างตับวัว (fresh beef liver puree) ในช่วงอุณหภูมิ 103-127 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ค่า k ที่ 102.9, 118.3 และ 126.7 องศาเซลเซียส มีค่า 17.9 x 10^{-5}, 68.0 x 10^{-5} และ 162.3 x 10^{-5}ต่อวินาที ตามลำดับ มีค่า Ea เท่ากับ 112 $\pm$ 9 กิโลจูลต่อโมล(4) ต่อมาได้ศึกษาผลขององค์ประกอบเช่น ปริมาณไขมันและความชื้นต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับวัวที่อุณหภูมิ 102, 112, และ 122 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวสามารถอธิบายโดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง องค์ประกอบที่มีผลต่อการสลายตัวได้แก่ ปริมาณไขมันและความชื้น โดยที่เมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้นการสลายตัวจะเร็วขึ้น ในขณะที่เมื่อปริมาณไขมันสูงขึ้นการสลายตัวจะช้าลง ค่า Ea อยู่ในช่วง 99-122 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันนักเมื่อองค์ประกอบเปลี่ยนไป ต่อมาได้ศึกษาผลของปริมาณความชื้น พีเอช และทองแดงที่อุณหภูมิ 102 และ 122 องศาเซลเซียส การสลายตัวยังคงอธิบายโดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ค่า Ea เท่ากับ 36-122 กิโลจูลต่อโมลขึ้นกับองค์ประกอบที่ศึกษาและปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณทองแดง (43)

15515