บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

กะทิ (Coconut Milk)

มะพร้าว (*Cocos nucifera* Linn.) เป็นพืชยืนต้น ใบเลี้ยงเดี่ยวที่ปลูกได้ง่ายและเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่แถบร้อนบริเวณชายฝั่งทะเล มะพร้าวเป็นพืชที่มีประโยชน์หลายอย่าง จากการใช้บริโภคเป็นอาหารโดยตรงขณะเป็นผลอ่อน คั้นเป็นกะทิจากผลแก่เพื่อนำไปประกอบอาหารคาวหวาน หรือสกัดน้ำมันจากเนื้อมะพร้าวแห้ง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ทั้งอุปโภคและบริโภค อาทิ เนยเทียม สบู่ เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น ลูกกวาดและเภสัชภัณฑ์

ประเทศไทยมีการใช้มะพร้าวในการประกอบอาหารและในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันอาหารสำเร็จรูปได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน จากการที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีในกระบวนการผลิตและแปรรูปอาหาร อีกทั้งผู้บริโภคยังต้องการความสะดวกรวดเร็วในการประกอบอาหาร จึงมีการผลิตกะทิสำเร็จรูปเพื่อสนองความต้องการดังกล่าว และส่งจำหน่ายยังต่างประเทศเพื่อให้เก็บไว้ได้นานและนำมาใช้ประกอบอาหารได้ทันที กะทิสำเร็จรูปที่ผลิตออกจำหน่ายมีหลายรูปแบบ ได้แก่ กะทิผงสำเร็จรูป กะทิบรรจุกระป๋อง กะทิ UHT และกะทิที่ผ่านกระบวนการ pasteurize ซึ่งต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น

กะทิเป็นของเหลวที่ได้จากการบีบอัดเนื้อมะพร้าวสดที่ผ่านการลดขนาดเป็นชิ้นฝอย โดยในขั้นตอนการบีบอาจเติมน้ำหรือไม่เติมก็ได้ กะทิมีลักษณะเป็น emulsion ชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion) ที่มีสาร emulsifier ตามธรรมชาติผสมรวมอยู่ด้วย จึงทำให้ emulsion มีความคงตัวระดับหนึ่ง Birosel และคณะ (1963) รายงานว่า ในกะทิมี emulsifiers พวก phospholipids ในปริมาณ 0.4% และมีโปรตีนซึ่งมีสมบัติเป็นสาร emulsifier ผสมรวมอยู่ประมาณ 3% ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติทำให้ emulsion ชนิดน้ำมันในน้ำเกิดความคงตัวได้ อย่างไรก็ตามแม้จะมี emulsifiers อยู่ก็ไม่สามารถทำให้ emulsion เสถียรได้ภายใต้ภาวะที่มีความเค้นบางอย่าง เช่น พลังงานความร้อน เพราะกะทิมีปริมาณน้ำมันอยู่มากเมื่อเทียบกับปริมาณโปรตีน (Monera, 1979) ความเข้มข้นของโปรตีนที่พื้นที่ผิวระหว่างอนุภาคน้ำมันกับวัฏภาคต่อเนื่อง คือ น้ำ จึงมีไม่มากพอที่จะป้องกันการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน ดังนั้นเมื่อตั้งกะทิทิ้งไว้จะแยกเป็นสองชั้น โดยชั้น

ล่างเป็นชั้นของหางกะทิ (coconut skimmed milk) และชั้นบนเป็นหัวกะทิ (coconut cream) (Escueta, 1980) การแยกชั้นของ emulsion โดยทั่วไปเริ่มจากอนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่อย่างอิสระลอยตัวสูงขึ้น อนุภาคน้ำมันมีแรงดึงดูดระหว่างกันจึงเคลื่อนที่เข้าเกาะกลุ่มกันใหญ่ขึ้น (flocculation) และในที่สุดรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น (coalescence) จนเกิดการแยกชั้นของน้ำมันและน้ำ (Friberg *et al*., 1990) Escueta (1980) รายงานว่า การแยกชั้นของกะทิจะเริ่มเกิดเมื่อตั้งทิ้งไว้ 5-10 ชั่วโมง และจะแยกสมบูรณ์ในเวลา 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการแยกชั้นนี้ไม่ใช่เป็นการแตกตัวของ emulsion อย่างถาวร สามารถเขย่าให้กลับเป็นเนื้อเดียวกันได้อีก

การแยกกะทิจากเนื้อมะพร้าว

ในการแยกกะทิจากเนื้อมะพร้าว ต้องกำจัดเนื้อเยื่อส่วนที่เป็นสีน้ำตาลออกจากเนื้อมะพร้าว เพราะถ้ามีผสมปะปนอยู่จะทำให้กะทิมีสีน้ำตาลและมีรสขม นำเนื้อมะพร้าวที่ได้มาล้างน้ำที่ใช้ล้างอาจใช้น้ำประปา น้ำร้อนหรือน้ำใส่สารเคมี เช่น sodium metabisulfite 0.1% (Unido, 1982) sodium hypochlorite 0.05% (del Rosario and Punzalan, 1977) เพื่อลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ Unido (1982) รายงานว่า น้ำที่ใช้ล้างเนื้อมะพร้าวควรเป็นน้ำเดือดจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิของเนื้อมะพร้าวทั้งชิ้นสูงกว่า 84°C เพราะโปรตีนในเนื้อมะพร้าวจะเสียสภาพ นอกจากนี้ Arumughan และคณะ (1993) แนะนำว่า การล้างเนื้อมะพร้าวด้วยน้ำที่มี H_2O_2 เข้มข้น 100 ppm ตามด้วยการลวกน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาทีก่อนการลดขนาด ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ lipase ได้

เนื้อเยื่อมะพร้าวประกอบด้วยเซลล์ parenchyma ซึ่งมีรูปร่างยาวเรียว มีความยาว 70-700 micron กว้าง 15-80 micron และมีน้ำมันอยู่ในลักษณะเป็นอนุภาคเดี่ยวๆอยู่ภายใน (Unido, 1982) ดังนั้นในการเตรียมกะทิจึงจำเป็นต้องมีการลดขนาดเนื้อมะพร้าวให้เหมาะสมเพื่อ ให้องค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ เช่น ไขมัน โปรตีน น้ำตาล ถูกปลดปล่อยออกมาจากเนื้อมะพร้าวได้มากที่สุด เครื่องมือที่ใช้ลดขนาดเนื้อมะพร้าวมีหลายชนิด เช่น colloid mill และ hammer mill เป็นต้น (Hagenmaier, 1977; Gonzalez *et al*., 1982) การใช้เครื่องมือลดขนาดที่แตกต่างกันจะมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดไขมันและโปรตีนออกจากเนื้อมะพร้าว Gonzalez และคณะ (1982) พบว่า เนื้อมะพร้าวซึ่งลดขนาดด้วยเครื่อง colloid mill จะมีขนาดเล็กที่สุด และให้ประสิทธิภาพการสกัดไขมันและโปรตีนสูงที่สุดกล่าว คือ สามารถสกัดเอาไขมันและโปรตีนออกจากเนื้อมะพร้าวสดได้ถึง 81.55% และ 74.66% ตามลำดับ

การแยกกะทิจากเนื้อมะพร้าว ทำได้โดยการคั้นด้วยมือหรือบีบด้วยเครื่องบีบ แรงที่ใช้คั้นหรือบีบเนื้อมะพร้าวจึงเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่ง เพราะถ้าใช้แรงไม่เหมาะสมจะมีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของกะทิที่ได้ การคั้นกะทิด้วยมือนั้น ทำกันมากในระดับครัวเรือน ซึ่งไม่เหมาะกับการคั้นกะทิปริมาณมากเพราะองค์ประกอบของกะทิที่ได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแรงที่ใช้ ดังนั้นการผลิตกะทิในระดับอุตสาหกรรมซึ่งต้องการกะทิในปริมาณมากและต้องการคุณภาพที่สม่ำเสมอจึงต้องใช้เครื่องบีบ จากลักษณะทางธรรมชาติของเส้นใยของเนื้อมะพร้าว Chu และคณะ (1969) แนะนำว่าควรใช้ระบบการบีบ 2 ขั้นตอน คือ ใช้เครื่องบีบแบบลูกกลิ้งและตามด้วยเครื่อง screw press เพื่อให้ได้ปริมาณกะทิมากที่สุด และรายงานว่าปริมาณไขมันของกะทิที่สกัดได้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องบีบด้วย Gonzalez และคณะ (1982) อธิบายว่าเครื่องบีบ hander expeller ให้ประสิทธิภาพในการสกัดไขมันและโปรตีนออกจากเนื้อมะพร้าวสูงกว่าเครื่องบีบแบบ hydraulic press กะทิที่ได้นำมากรองด้วยผ้าขาวบางหรืออาจนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วต่ำโดยใช้ basket centrifuge เพื่อแยกเอาอนุภาคเล็กๆ ที่หลงเหลืออยู่ออกโดยไม่ทำให้สภาพ emulsion ของกะทิเสียไป (Seow and Gwee, 1997)

องค์ประกอบทางเคมีของกะทิ

องค์ประกอบทางเคมีของกะทิมีความผันแปรอย่างมากจากปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพล ได้แก่ พันธุ์ สภาพทางภูมิศาสตร์ การเพาะปลูก ความแก่-อ่อนของผล วิธีการแยกจากเนื้อ และระดับการเจือจาง กะทิที่แยกจากเนื้อโดยไม่มีการเติมน้ำมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ คือ ความชื้น 50-54% ไขมัน 32-40% โปรตีน (NX6.25) 2.8-4.4% เถ้า 1.0-1.5% และคาร์โบไฮเดรต 5.5-8.3% (Nathaneal, 1954; Popper *et al*., 1966; Jeganathan, 1970; Anon, 1984)

คาร์โบไฮเดรตที่พบมากในกะทิเป็นน้ำตาล sucrose และ starch แร่ธาตุหลักที่พบในกะทิสด คือ phosphorus, calcium และ potassium (Anon, 1984) กะทิที่ผลิตได้ใหม่ๆ มีวิตามินบีและวิตามินซีอยู่ในปริมาณเล็กน้อย (Seow and Gwee, 1997)

โปรตีนที่พบมากในกะทิคือ albumin และ globulin ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีปริมาณมากถึง 80% ของโปรตีนทั้งหมดที่พบใน endosperm ของมะพร้าว ปริมาณโปรตีนในกะทิที่ไม่มีการเติมน้ำอยู่ในช่วง 5-10% ของน้ำหนักแห้ง โดย ประมาณ 30%ของโปรตีนในกะทิที่กรองได้ละลายอยู่ในวัฏภาคน้ำ ส่วนโปรตีนที่ไม่ละลายจะแสดงสมบัติเป็นสาร emulsifier ซึ่งอยู่ล้อมรอบอนุภาคไขมัน จากการศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดย Kwon และคณะ (1996) พบว่า

โปรตีนในกะทิมีอุณหภูมิเสียสภาพ (denaturation temperature) 2 อุณหภูมิ คือ ที่ 92°C เป็นการเสียสภาพของ albumin และ globulin บางส่วน และที่ 110°C เป็นการเสียสภาพของ globulin นอกจากนี้ Seow และ Goh (1994) ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อความคงทนความร้อนของ albumin และ globulin ในกะทิ พบว่า โปรตีนทั้งสองชนิดเสถียรต่อความร้อนมากที่สุดที่ pH 5-9 และความคงทนเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำตาล polyols และเกลือ (NaCl) โดยทั่วไปโปรตีน albumin และ globulin มีกรดอะมิโน glutamic, arginine และ aspartic ในปริมาณสูง แต่มี methionine ในปริมาณต่ำ จึงถือว่าเป็น limiting amino acid

กะทิมีปริมาณไขมันและแคลอรีสูง มีกลิ่นหอมเฉพาะ ไขมันในกะทิเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 26-27°C มี triglycerides เป็นองค์ประกอบ 84-93.1% ที่เหลือเป็น 1,2-diglycerides 1.5-5.1%, 1,3-diglycerides 1.2-21%, monoglycerides 1-7%, free fatty acids 1-1.26%, phospholipids 0.03-0.4%, glycolipids 0.2-0.35 % และ sterols 0.1% (Gopalakrishnan *et al.*, 1987)

ไขมันในกะทิมีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่า 90% ขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะ oleic และ linoleic acid มีประมาณ 10% ของกรดไขมันทั้งหมด สำหรับกรดไขมันอิ่มตัว มี lauric acid มากที่สุดประมาณ 40-50% รองลงมาคือ myristic acid 13-19% และ palmitic acid 4-18% จึงเรียกได้ว่าเป็น น้ำมันกลุ่ม lauric acid หรือ lauric oil นอกจากนี้พบกรดไขมันอิ่มตัวที่มี C_6-C_{10} ซึ่งไม่พบในน้ำมันพืชชนิดอื่น และจากการที่มีกรดไขมันอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปริมาณมาก ทำให้ไขมันกะทิหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าน้ำมันมะพร้าว มีจุดหลอมเหลว 24-27 °C และอุณหภูมิในการแข็งตัวประมาณ 5°C หรือต่ำกว่า ความแก่-อ่อนของผลมะพร้าวที่นำเนื้อมาสกัดน้ำมัน มีผลต่อกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน โดยน้ำมันที่ได้จากมะพร้าวที่อ่อนกว่ามี C_6-C_{10} และ lauric acid ต่ำ มี palmitic, oleic และ linoleic acids ที่สูงกว่า ขณะที่กรดไขมัน 3 ชนิดหลังลดลงอย่างเห็นได้ชัดในมะพร้าวแก่ (Salunkhe *et al.*, 1992)

การเสื่อมคุณภาพของอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นส่วนประกอบ

อาหารมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างในระหว่างกระบวนการแปรรูป และเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีอิทธิพลต่อคุณภาพของอาหาร ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อคุณภาพของอาหารระหว่างการแปรรูป และการเก็บรักษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน และแสง ซึ่งมีผลนำไปสู่การเสื่อมเสียของอาหารที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์

(Singh, 1994) การเสียของอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นส่วนประกอบนั้น ส่วนใหญ่มักเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีมากกว่าจากจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาเคมีที่ก่อให้เกิดกลิ่นหืนในอาหารที่มีน้ำมันและไขมันเป็นส่วนประกอบ มี 2 ประเภท ได้แก่ การเกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยา hydrolysis และการเกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยา oxidation

การเกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Rancidity)

ไขมันหรือน้ำมันที่มี triglycerides น้ำหนักโมเลกุลปานกลางสามารถย่อยสลายได้เป็น glycerol และ free fatty acids (FFA) ปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยานี้มี 2 ปัจจัย คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายจากการเร่งของเอนไซม์ lipase กับอีกปัจจัยหนึ่งคือ พลังงานความร้อน และความชื้น

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis โดยเอนไซม์ lipase คือ 37°C และ pH ที่เหมาะสม คือ 7.5 นอกจากนี้ calcium ion เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของเอนไซม์ และประเภทของน้ำมัน ยังมีผลต่อปฏิกิริยาดังกล่าวด้วย (Khor *et al.*, 1986) นอกจากปฏิกิริยาของเอนไซม์แล้ว พลังงานความร้อนและความชื้นสูง เช่น การใช้ความร้อนสูงในการทอดแบบ deep-fat-frying (160-190°C) ทอดอาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจะทำให้ปฏิกิริยา hydrolysis เกิดได้ดี (Nawar, 1996)

กรดไขมันสายโซ่สั้นที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลของ triglycerides จากปฏิกิริยา hydrolysis จะให้กลิ่นรสแตกต่างกัน เช่น butyric และ capryric acid ให้ rancid flavor, caproic acid ให้ sweet, goaty flavor และ capric acid ให้ waxy flavor สำหรับน้ำมันมะพร้าวเมื่อ hydrolyze แล้วจะเกิด soapy flavor จาก myristic acid เด่นชัดที่สุด (Ohlson, 1976) Rossell (1994) กล่าวว่า การหืนแบบ hydrolytic เป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น lauric oil เช่น น้ำมันเนื้อในเมล็ดปาล์ม (palm kernel) หรือน้ำมันมะพร้าว โดย free fatty acids ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันสายโซ่สั้น คือ capric , lauric และ myristic ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นคล้ายสบู่ Shukla (1995) รายงานว่า กรดไขมันสายสั้นมีค่า threshold ของกลิ่นรส ต่ำกว่ากรดไขมันสายโซ่ยาว ดังนั้นการมี free fatty acids เหล่านี้เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้กลิ่นรสของอาหารเปลี่ยนไปได้ threshold ของกลิ่นรสของ butyric acid มีค่าเพียง 0.6 ppm ขณะที่ lauric acid มีค่า 700 ppm และ stearic acid สูงถึง 15,000 ppm

น้ำมันมะพร้าวมีขีดจำกัดในการใช้เพราะการ hydrolysis เพียงเล็กน้อยทำให้เกิดกรดไขมันโมเลกุลสั้นๆ ที่ให้กลิ่นรสที่แรงมาก โดยจะเกิดอย่างช้าๆ เมื่อมีความชื้น และเร็วมากขึ้นถ้ามีเอนไซม์ lipase อยู่ด้วย (Weiss,1970) ซึ่งเอนไซม์นี้อาจมาจากเนื้อเยื่อของพืชหรือมาจากจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน เอนไซม์ lipase จะ hydrolyze พวก insoluble fats และ fatty acid esters โดยปกติพบเอนไซม์ lipase ที่ oil-water interface ของกะทิ และเอนไซม์ทำงานได้ดี ถ้าอาหารนั้นกระจายตัวในรูป emulsion น้ำมันมะพร้าวที่สกัดจากเนื้อมะพร้าวแห้งที่สะอาดและเก็บรักษาอย่างถูกวิธีจะมีปริมาณ free fatty acids ต่ำ แต่น้ำมันที่สกัดจากเนื้อมะพร้าวที่แห้งไม่สนิทและเก็บรักษาไม่ดีจะมีปริมาณ free fatty acids สูงมาก (Hoover *et al.*, 1973) เอนไซม์ lipase สามารถทำลายได้โดยการให้ความร้อนตั้งแต่ 60-70°C และจะทำลายได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิ 90-100°C (Ohlson, 1976) Vanneck (1947) พบว่า เมื่อจุ่มผลมะพร้าวทั้งเปลือกลงในอ่างน้ำร้อนจนผลมะพร้าวทั้งลูกมีอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 2-3 นาที สามารถทำลายเอนไซม์ lipase ในเนื้อเยื่อได้

จุลินทรีย์จำพวก lipolytic microorganisms ที่สามารถผลิตเอนไซม์ lipase ออกมาย่อยสลายไขมันหรือน้ำมันในอาหารแล้วก่อให้เกิดกลิ่นหืนขึ้น ได้แก่ *Pseudomonas fragi, Pseudomonas fluorescences, Candida lipolyticum, Geotrichum candidum, Achromobacter lipolyticum* และ *Penicillium roqueforti* ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเกิดการปนเปื้อนหลังการให้ความร้อน ระหว่างการบรรจุและปิดผนึกผลิตภัณฑ์ และจุลินทรีย์เหล่านี้เจริญและผลิตเอนไซม์ lipase ได้แม้ที่อุณหภูมิเยือกแข็ง (Alford and Pierce, 1961; Andersson *et al.*, 1979)

การติดตามปฏิกิริยาการเกิดกลิ่นหืนจาก hydrolysis

การวัดการทำงานของเอนไซม์ lipase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นิยมวัดเป็นค่า free fatty acids (%FFA) เนื่องจาก เมื่อเกิดปฏิกิริยา hydrolysis แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ free fatty acids และ glycerol การวัด free fatty acids จะอาศัยวิธีการ titrate ด้วยด่าง (titration by alkali) (Jadhav *et al.*, 1996) โดย free fatty acids ที่เกิดจากปฏิกิริยา hydrolysis สามารถทำปฏิกิริยากับด่าง เช่น KOH ที่มีสารละลาย phenolphthalein เป็น indicator จนสารผสมเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนและไม่จางหายภายใน 30 วินาที การคำนวณปริมาณ FFA สามารถคำนวณออกมาในรูปของ oleic acid (M.W. 282) หรือ palmetic acid (M.W. 256) หรือ lauric acid (M.W. 200) ได้อีกด้วย

การเกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยา oxidation (Oxidative Rancidity)

กลไกการเกิดปฏิกิริยา oxidation ในระบบ emulsion มีความแตกต่างจากในไขมันหรือน้ำมันทั่วไป เนื่องจาก ระบบ emulsion มีความซับซ้อน จึงทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของสารประกอบแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ลักษณะโดยทั่วไปของ emulsion มักไม่เสถียร ดังนั้นการมีองค์ประกอบที่สาม เช่น emulsifier หุ้มเป็นชั้นบางรอบอนุภาคของของเหลวชนิดหนึ่งไว้จะช่วยให้ระบบ emulsion นั้นมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ผลจากการมีเยื่อบางรอบอนุภาคทำให้กลไกการเกิดปฏิกิริยา oxidation ในระบบ emulsion แตกต่างจากในไขมันหรือน้ำมันทั่วไป (McClements and Decker, 2000) โดยในระบบ emulsion ชนิด oil-in-water ปฏิกิริยา oxidation เกิดที่บริเวณเยื่อหุ้มผิวของอนุภาคไขมัน โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง lipid hydroperoxides ที่อยู่บริเวณผิวอนุภาคไขมันกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ภายในวัฏภาคน้ำ

McClements และ Decker (2000) ได้อธิบายกลไกของปฏิกิริยา oxidation ในระบบ emulsion ชนิด oil-in-water ไว้ว่า กลไกของปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ ส่วนใหญ่เป็นการสลายของสาร hydroperoxides (ROOH) ไปเป็น peroxy radicals (ROO°) และ alkoxy radicals (RO°) โดยมีไอออนของโลหะหนัก เช่น ไอออนของเหล็ก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้น peroxy radicals และ alkoxy radicals ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมันอื่นเกิดเป็น hydroperoxides โมเลกุลใหญ่ และ lipid radicals (L°)

ในขั้นต่อมา lipid radicals ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ไวต่อปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็น peroxy radicals ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่กับโมเลกุลของกรดไขมันอื่น ได้ hydroperoxides และ lipid radicals อีก โดยปฏิกิริยาในขั้นนี้จะเกิดซ้ำกันหลาย ๆ ครั้งและต่อเนื่อง ทำให้เกิด hydroperoxides เพิ่มขึ้นมากมาย

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นรวมทั้ง hydroperoxides จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ให้ผลผลิตเป็น hydrocarbons, ketones และ aldehydes ซึ่งมีโมเลกุลเล็กลงและเป็นตัวการที่ทำให้เกิดกลิ่นหืน หรือกล่าวได้ว่า ในขั้นสุดท้ายของปฏิกิริยา oxidation ของไขมัน อนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาลูกโซ่ จะเกิดการรวมตัวในรูปแบบต่างๆ ได้สารประกอบที่ไม่เป็นอนุมูล (non-radicals) ที่มีความเสถียร

การติดตามปฏิกิริยาการเกิดกลิ่นหืนจาก oxidation

วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบความหืนจากปฏิกิริยา oxidation แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ประเภทแรก วัดการเปลี่ยนแปลงในระยะเริ่มแรกของปฏิกิริยา (primary changes) ขณะที่ประเภทที่ 2 วัดการเปลี่ยนแปลงในระยะที่สอง (secondary changes) ที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบ (Shahidi and Wanasundara, 2002) วิธีที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงในระยะแรกได้แก่ การวัดค่า peroxide หรือ PV และค่า conjugated diene หรือ CD ในขณะที่การวัดการเปลี่ยนแปลงในระยะที่สอง ทำได้หลายวิธี อาทิ การวัดค่า anisidine หรือ AnV, ค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดไขมัน และค่า thiobarbituric หรือ TBA สำหรับอาหารที่มีเนื้อสัตว์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย การวัดค่า TBA เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว เพราะทำได้โดยไม่ต้องสกัดไขมันออกจากเนื้อเยื่อก่อน (Pearson, 1970) นอกจากนี้การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถติดตามปฏิกิริยาการเกิดกลิ่นหืนได้

Peroxide Value

การวัดค่า PV เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่มีอยู่ในน้ำมัน โดยคิดเป็นมิลลิกรัมสมมูล (milli equivalent) ต่อน้ำมันหนึ่งกิโลกรัม หลักการในการหาค่า PV จะอาศัยวิธี iodometric โดย hydroperoxides ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำปฏิกิริยากับ iodide ion ได้ iodine (I_2) เกิดขึ้น ซึ่ง iodine ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ peroxides ที่มีอยู่ และ iodine ที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้โดยการทำปฏิกิริยากับ sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) ที่มีน้ำแป้งเป็น indicator (Koniecko, 1979)

Conjugated Dienes

conjugated dienes มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นลักษณะพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว ซึ่งโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ไม่ค่อยพบในกรดไขมันทั่วไป (Banni *et al.*, 1993) การเกิดปฏิกิริยา oxidation ของ polyunsaturated fatty acids (PUFA) ติดตามได้โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง ultraviolet (UV absorption) ของผลิตผลที่ได้ ไขมันที่ประกอบด้วย methylene-interrupted dienes หรือ polyenes จะเกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งพันธะคู่ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา oxidation ซึ่งเป็นผลจาก isomerization และ conjugated formation (Logani and Davies, 1980) โดย conjugated dienes ที่เกิดขึ้นดูดกลืนแสง UV ได้ดีที่ความยาวคลื่น 234 nm ส่วน conju-

gated trienes ดูดกลืนแสง UV ได้ดีที่ความยาวคลื่น 268 nm Farmer และ Sutton (1946) รายงานว่า การดูดกลืนแสง UV จะเกิดขึ้นเมื่อมี conjugated dienes และ trienes โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนและการเกิด peroxides ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา oxidation ในระยะแรก (early stages of oxidation) Shahidi และคณะ (1994) และ Wanasundara และคณะ (1995) พบว่า conjugated dienes และ PV ของ marine oil และน้ำมันพืช มี correlation กันในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา oxidation จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้ จึงอาจใช้วิธีการวิเคราะห์ conjugated dienes ในการวัดความคงตัวของไขมันหรือน้ำมัน แทนการวัดค่า PV ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีสารประกอบที่ดูดกลืนแสง UV ได้ในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันนี้ เช่น ตัวอย่างน้ำมันที่มี carotenoids เป็นองค์ประกอบจะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าปกติที่ความยาวคลื่น 234-236 nm เนื่องจากลักษณะพันธะคู่ในโครงสร้างของ carotenoids เป็นแบบ conjugation จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้

Anisidine Value

Shahidi และ Wanasundara (2002) รายงานว่า วิธีนี้ใช้วัดปริมาณ aldehydes (โดยเฉพาะ 2-alkenals และ 2,4-alkadienals) ในน้ำมันหรือไขมัน โดย aldehydes ที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation จะทำปฏิกิริยากับ *p*-anisidine reagent ภายใต้ภาวะเป็นกรด ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวให้สารสีเหลือง ซึ่งดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 350 nm การรายงานผลของค่า anisidine สามารถทำในรูปของ TOTOX value หรือ oxidative value (OV) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2PV+AnV โดย TOTOX value เป็นค่าที่แสดงผลของการเกิดปฏิกิริยา oxidation ทั้งในช่วง primary changes (วัดในรูปค่า PV) และ secondary changes (วัดในรูป AnV) ของปฏิกิริยา oxidation หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่แสดงการเกิดปฏิกิริยา oxidation ทั้งหมดในระบบอาหาร

TBA Value

ค่า TBA นิยมใช้ในการวัดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเนื้อเยื่ออาหาร ค่า TBA วัดเป็นจำนวน mg malonaldehyde (MA) ต่อตัวอย่าง 1 kg หรือวัดเป็น μmoles MA ต่อตัวอย่าง 1 g MA เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ polyunsaturated fatty acids ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ TBA reagent ให้สารละลายสีชมพูที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 530-532 nm (Tarladgis *et al.*, 1964) โดยปริมาณแสงที่ดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของ MA กลไกการเกิด MA เริ่มจากกรดไขมันที่มีจำนวนพันธะคู่ตั้งแต่ 3

พันธะขึ้นไป โดย Dahle และคณะ (1962) รายงานว่า radicals ที่มีพันธะคู่ β-γ กับ carbon ที่มีหมู่ peroxy (เกิดขึ้นได้เฉพาะกับกรดไขมันที่มีจำนวนพันธะคู่มากกว่า 2 พันธะขึ้นไป) เกิด cyclization ได้วงแหวน peroxides ที่สามารถสลายตัวไปเป็น MA

Tarladgis และคณะ (1964) รายงานว่า สาร TBA ไม่เสถียร เกิดการแตกตัวได้ ภายใต้ภาวะที่ใช้ทดสอบ คือ ความร้อนและกรดแก่ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็มีข้อดีคือ ใช้ได้กับเนื้อเยื่ออาหารทุกชนิด และเห็นการเกิด oxidation ของวัตถุดิบได้ง่ายกว่าวิธีอื่นๆ ที่ต้องสกัดไขมันออกจากเนื้อเยื่ออาหารก่อน

Shahidi และ Wanasundara (2002) อธิบายว่า การวิเคราะห์ค่า TBA มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ วิธีกลั่น วิธีสกัด และ วิธีวัดโดยตรง สำหรับวิธีกลั่น เป็นวิธีการกลั่นสารประกอบที่ระเหยได้ (volatile substance) ออกมาพร้อมกับไอน้ำ แล้วจึงนำสารที่กลั่นได้มาทำปฏิกิริยากับ TBA reagent วิธีสกัดทำโดยสกัด TBA-reactive substances (TBARSs) จากอาหารด้วย aqueous medium เช่น สารละลาย trichloroacetic acid ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยากับ TBA reagent และวิธีวัดโดยตรงใช้กับน้ำมันและไขมัน โดยให้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ TBA reagent ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้งสาม พบว่า สองวิธีแรกใช้เวลาในการวิเคราะห์นานและอาจเกิดสารประกอบอื่นที่ไม่ต้องการวัด (artifact formation) ในขณะที่วิธีสุดท้ายเป็นวิธีที่ง่ายและใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นกว่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเทคนิค gas chromatography ใช้แยกสารที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นวัฏภาคก๊าซ ได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง (ไม่เกิน 450°C) ถ้าสารใดเปลี่ยนให้เป็นก๊าซได้ยากก็อาจใช้เทคนิคอื่นๆ บางอย่างเข้าช่วย เช่น อาศัยปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์อื่นๆ เช่น การทำ methylation ของกรดไขมัน หรืออาจใช้หลักการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) เมื่อสารนั้นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปก๊าซแล้ว จึงผ่านเข้าไปยัง column ที่บรรจุด้วย stationary phase โดยอาศัยการพาไปของ mobile phase หรือ carrier gas สารผสมเหล่านั้นจะเกิดการแยกเป็นองค์ประกอบต่างๆ ขึ้นมา (Shahidi and Wanasundara, 2002)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation)

การประเมินคุณภาพของอาหารโดยใช้ประสาทสัมผัส มีความสำคัญมากในส่วนที่เกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร การพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการควบคุมคุณภาพ เพราะเป็นเครื่องมือในการวัดคุณภาพที่แสดงออกจากความรู้สึกของมนุษย์โดยตรง ในการทดสอบอาจใช้ผู้ทดสอบจำนวนมาก หรือจำนวนน้อยก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการประเมินคุณภาพ การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่เรียกว่า subjective test อาจใช้ควบคู่ไปกับการวัดค่าทางเคมีหรือกายภาพ โดยใช้เครื่องมือ (objective test) เพื่อเป็นการตรวจสอบผลการประเมินอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง subjective test และ objective test จึงมีความสำคัญในการประเมินคุณภาพอาหาร (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2535)

ธงชัย สุวรรณสิชณน์ (2550) อธิบายว่า การทดสอบทางประสาทสัมผัสอาจแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการนำข้อมูลมาใช้ ได้เป็น 3 วิธี ได้แก่ การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ (Discrimination หรือ Difference test) การทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (Descriptive test) และการทดสอบเพื่อหาความชอบหรือการยอมรับในผลิตภัณฑ์ (Preference /Acceptance test)

การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบแรก คือ การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโดยรวมทั้งหมด (Overall difference test) เพื่อให้ทราบว่า ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเปรียบเทียบกันนั้นมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยรวมทั้งหมดแตกต่างกันหรือไม่ ตัวอย่างของการทดสอบวิธีนี้ได้แก่ Triangle test ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของ 2 ตัวอย่าง ที่นำเสนอตัวอย่างพร้อมกัน 3 ตัวอย่าง โดยมีตัวอย่างเหมือนกัน 2 ตัวอย่าง (identical samples) และอีกตัวอย่างแตกต่าง (odd sample) Duo-Trio test เป็นการทดสอบความแตกต่าง 2 ตัวอย่าง พร้อมกับอีกตัวอย่างที่เรียกว่าตัวอย่างมาตรฐาน ซึ่งเลือกมาจากตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งใน 2 ตัวอย่างและผู้ทดสอบต้องบอกว่าตัวอย่างใดใน 2 ตัวอย่างที่มีลักษณะเหมือนกับตัวอย่างมาตรฐาน และ Difference from control test วิธีนี้มีการเสนอตัวอย่างที่กำหนดให้เป็นตัวอย่างควบคุม หรือตัวอย่างอ้างอิง หรือตัวอย่างมาตรฐานให้กับผู้ทดสอบก่อนเพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบอีก 1 ตัวอย่าง หรือมากกว่า ผู้ทดสอบจะอธิบายความแตกต่างของตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมออกมาเป็นระดับค่าคะแนนความแตกต่างว่ามีความแตกต่างมากน้อยแค่ไหน (ตัวอย่างระดับค่าคะแนนความแตกต่างที่ใช้ เช่น 0

ถึง 10 โดยที่ 0 หมายถึง แตกต่างมากที่สุด ไปจนถึง 10 หมายถึง ไม่มีความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม เป็นต้น)

การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ รูปแบบที่ 2 คือ การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของลักษณะเฉพาะ (Attribute difference test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบเปรียบเทียบกันนั้น มีความแตกต่างด้านลักษณะทางประสาทสัมผัสในทิศทางของความแตกต่าง (Directional difference) ที่มากกว่าหรือน้อยกว่ากัน ตัวอย่างการทดสอบวิธีนี้ ได้แก่ Paired comparison test ซึ่งเสนอตัวอย่าง 2 ตัวอย่างพร้อมกัน เพื่อเปรียบเทียบว่ามีความแตกต่างกันในทิศทางที่มากกว่าหรือน้อยกว่ากัน Ranking test เป็นการเปรียบเทียบตัวอย่างตั้งแต่ 3 ตัวอย่างขึ้นไป โดยให้ผู้ทดสอบเรียงลำดับความเข้มของตัวอย่างตามลักษณะทางประสาทสัมผัสนั้น

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (Descriptive test) ทำเมื่อมีความต้องการให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพื่อช่วยในการแยกแยะลักษณะทางประสาทสัมผัสที่มีความสำคัญของผลิตภัณฑ์ และยังให้ข้อมูลด้านระดับความเข้มของลักษณะทางประสาทสัมผัสว่ามีอยู่มากน้อยเพียงไร ตัวอย่างของการทดสอบวิธีนี้ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบพรรณนาเชิงปริมาณ หรือ Quantitative descriptive analysis (QDA) ซึ่งให้ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกและฝึกฝนประมาณ 8-10 คน ประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยให้คะแนนความเข้มของแต่ละลักษณะบนสเกลที่เป็นแบบเส้นตรง ที่มีความยาวระดับหนึ่ง โดยที่ปลายเส้นแต่ละข้างกำหนดความอ่อนหรือเข้มของแต่ละลักษณะไว้

การทดสอบเพื่อหาความชอบหรือการยอมรับผลิตภัณฑ์ ใช้เพื่อสอบถามความรู้สึกของผู้ทดสอบในแง่ความชอบหรือการยอมรับผลิตภัณฑ์ ผู้ทดสอบคือ กลุ่มคนทั่วไป หรือผู้บริโภคทั่วไป วิธีนี้เหมาะสำหรับศึกษาหาความชอบ หรือการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ (consumer test) การสำรวจความต้องการของผู้บริโภค (consumer survey) ข้อมูลที่ได้นำไปใช้พัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค

สารกันหืน (Antioxidants)

สารกันหืนหมายถึง สารที่สามารถชะลอหรือลดการเกิดกลิ่นหืนหรือการเสื่อมเสียกลิ่นรสอื่น ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation ของน้ำมัน ไขมัน และอาหารที่มีน้ำมันหรือไขมันเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะการยืดเวลาในระยะเริ่มต้นของปฏิกิริยา (Pokorny *et al.*, 2001) โดยสารกันหืนจะทำปฏิกิริยากับ lipid radicals ที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นรวมทั้งระยะต่อเนื่อง (propagation period) โดยการทำปฏิกิริยากับ peroxy radicals หรือ alkoxy radicals ได้ผลผลิตที่เสถียรหรือได้ antioxidant radicals (A°) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า free radicals อื่นมาก จึงทำให้ปฏิกิริยา oxidation ที่เกิดขึ้นแบบลูกโซ่หยุดชะงักไป

สารกันหืนจำแนกตามแหล่งที่มาได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มแรกเป็นสารกันหืนที่ได้จากการสังเคราะห์ (synthetic antioxidants) และกลุ่มที่สองเป็นสารกันหืนจากธรรมชาติ (natural antioxidants) ตัวอย่างสารกันหืนสังเคราะห์ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ได้กับอาหาร ได้แก่ butylated hydroxy anisole (BHA), butylated hydroxy toluene (BHT), tertiary butylhydroquinone (TBHQ) และ propyl gallate (PG) สารกันหืนเหล่านี้เป็นสารกันหืนที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการหืนได้ดี โดย BHA และ BHT เป็นสารกันหืนที่มีความเสถียรต่อความร้อนและมีคุณสมบัติ carry through ส่วน PG ไม่ทนต่อความร้อนสามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้ ขณะที่ TBHQ เป็นสารกันหืนที่ทนความร้อนได้มากสุด จึงนิยมใช้ในอาหารทอด สำหรับสารกันหืนจากธรรมชาติ มีแหล่งที่มาทั้งจากเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ และ มีประสิทธิภาพในการป้องกันการหืนจากปฏิกิริยา oxidation ได้ดี ตัวอย่างสารกันหืนจากธรรมชาติที่นิยมใช้ในทางการค้าที่สำคัญได้แก่ ascorbic acid, สารสกัดจาก rosemary และ tocopherol (Reische *et al.*, 1998)

ปัจจุบันผู้บริโภคมีความสนใจด้านความปลอดภัยของอาหาร และผลของวัตถุเจือปนในอาหารต่อสุขภาพมากขึ้น (Reische *et al.*, 1998) แม้สารกันหืนสังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าต้นทุนต่ำกว่า และ มีความคงตัวสูงกว่าสารกันหืนธรรมชาติ แต่ก็ยังไม่ชัดเจนว่าสารกันหืนเหล่านี้จะมีผลทางลบต่อสุขภาพหรือไม่ จึงเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การลดปริมาณการใช้สารสังเคราะห์ จากความต้องการของผู้บริโภคทำให้แนวโน้มการใช้วัตถุเจือปนอาหารจากธรรมชาติในอุตสาหกรรมอาหารสูงมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาการสกัด และจำแนก (identification) สารกันหืนจากแหล่งธรรมชาติมากขึ้น (Reische *et al.*, 1998)

ปัจจุบันมีข้อมูลด้านความเป็นพิษของสารกันหืนที่ยืนยันว่า การใช้สารกันหืนสังเคราะห์เป็นเวลานาน ภายใต้ความดันสูง ก่อให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้ (Pokorny *et al.*, 2001) Kahl และ Kappus (1993) ได้ทดสอบความเป็นพิษของ BHA และ BHT เปรียบเทียบกับ tocopherols พบว่า การใช้ BHA, BHT และ tocopherols ในปริมาณสูง เป็นสาเหตุให้เกิดเนื้องอกในหนูทดลอง จากการเปรียบเทียบอันตรายที่จะได้รับจากสารกันหืนทั้ง 3 ชนิด พบว่า tocopherols มีความปลอดภัยมากกว่าการใช้ BHA และ BHT

เครื่องเทศเป็นแหล่งของสารกันหืนจากธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ เครื่องเทศแสดงประสิทธิภาพเป็นสารกันหืนในผลิตภัณฑ์หลายชนิด อาทิ ไขมันและน้ำมัน ขนมหวานและช็อคโก-แลต ผลิตภัณฑ์เนื้อ และผลิตภัณฑ์ขนมอบ องค์ประกอบที่เป็นสารกันหืนหลักของเครื่องเทศ คือ สาร phenolics การใช้เครื่องเทศเป็นสารกันหืนมีข้อจำกัดในเรื่อง สี กลิ่น และรสชาติของเครื่อง-เทศ จึงได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาการสกัดเครื่องเทศให้ได้ลักษณะที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส (Madhavi *et al.*, 1996)

Chipault และคณะ (1952) ศึกษาการนำเครื่องเทศบางชนิดมาใช้เป็นสารกันหืน พบว่า มีหลายชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง และนำมาใช้กันจนถึงปัจจุบัน สารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบที่มีชื่อว่า rosmaridiphenol, rosmariquinone, carnosol และ rosmanol ซึ่งสกัดจากเครื่องเทศ rosemary และมีรายงานว่า rosemary เป็นแหล่งของสารกันหืนประเภท phenolics สารสกัดจาก rosemary ที่ความเข้มข้น 0.02-0.5% โดยน้ำหนัก จะยับยั้งออกซิเดชันในเนื้อวัว หมู ไก่ และไส้กรอกแฟรงเฟอเตอร์ได้ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4-5°C เป็นเวลา 5-18 วัน (Mielche and Bertel-sen, 1994)

Frankel และ Huang (1996) พบว่า สารสกัดจาก rosemary มีประสิทธิภาพในการป้องกันการหืนในน้ำมันข้าวโพด และน้ำมันถั่วเหลืองได้ดี แต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำของน้ำมันดังกล่าว Cort (1974) ศึกษาความสามารถในการป้องกันการหืนของเครื่องเทศ 9 ชนิด คือ ลูกจันทน์เทศ (nutmeg), ดอกจันทน์เทศ (mace), rosemary, sage และ thyme ในรูปเครื่องเทศแห้ง (whole spice) เปรียบเทียบกับสารสกัดเครื่องเทศ (spice extract) ในระบบของน้ำมันดอกคำฝอยในรูปอิมัลชัน (safflower oil emulsion) พบว่า เครื่องเทศเกือบทั้งหมดมีประ-สิทธิภาพในการป้องกันการเกิดกลิ่นหืนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ในรูปสารสกัด โดยเฉพาะ rosemary และ mace จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการเตรียมเครื่องเทศที่จะใช้ทดสอบการหืน มีความสำคัญต่อความสามารถในการป้องกันการหืน

Tocopherols

tocopherols หรือวิตามินอี เป็นสารกันหืนที่พบตามธรรมชาติครั้งแรกในปี 1920 โดย Evans และ Bishop (Deshpande *et al.*, 1996) ประกอบด้วยกลุ่มของ tocols หรือ tocopherols และ tocotrienols ซึ่งพบมากในเนื้อเยื่อพืชโดยเฉพาะถั่ว น้ำมันพืช ผัก ผลไม้ แหล่งที่มีสูงคือ ข้าวสาลี ข้าวโพด เมล็ดทานตะวัน rape seeds น้ำมันถั่วเหลือง และ alfalfa tocopherols เป็นสารกันหืนที่มีข้อจำกัดในด้านความคงตัวที่ภาวะใช้งาน (Madhavi *et al.*, 1996)

tocopherols และ tocotrienols แต่ละชนิดประกอบด้วย 4 isomers คือ α , β , γ และ δ หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของทั้ง tocopherols และ tocotrienols คือ 6-chromanol ring โดยมี phytol เป็นสายโซ่ด้านข้าง α , β , γ และ δ แตกต่างกันที่จำนวน methyl group ที่จับกับ aromatic ring และ tocotrienols ต่างจาก tocopherols ตรงความไม่อิ่มตัวของสายโซ่ด้านข้าง โดยมีพันธะคู่ที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 3, 7 และ 11 (Madhavi *et al.*, 1996)

ความสามารถในการเป็นสารกันหืนของ α , β , γ และ δ tocopherols และ tocotrienols แตกต่างกันโดยระดับของการขัดขวาง (hindrance) และอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 37°C ความสามารถในการเป็นสารกันหืนเรียงลำดับได้ดังนี้ $\alpha > \beta > \gamma > \delta$ ส่วนที่อุณหภูมิ 50-100 °C ความสามารถในการเป็นสารกันหืนจะตรงข้ามกันคือ $\delta > \gamma > \beta > \alpha$ และ tocopherols ที่มีความสามารถในการป้องกันออกซิเดชันในระบบสารชีวภาพมากที่สุดคือ α-tocopherol โดยมีความสามารถเป็น 2 เท่าของ β และ γ-tocopherol และมีความสามารถมากกว่า δ-tocopherol ถึง 100 เท่า (Madhavi *et al.*, 1996) ส่วน δ-tocotrienol มีความสามารถเท่ากับ 25% ของความสามารถของ α-tocotrienol และมีความสามารถในการเป็นสารกันหืนมากกว่า β-tocotrienol 5 เท่า (Deshpande *et al.*,1996) จึงทำให้ α -tocopherol เป็นที่นิยมใช้มากกว่า tocopherols รูปแบบอื่น

Houlihan และ Ho (1985) ได้สรุปไว้ว่า ประสิทธิภาพของ tocopherols ทั้ง 4 ชนิด สามารถสลับสับที่กันได้ ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร ภาวะในการใช้ และอุณหภูมิ ประสิทธิภาพของ tocopherols ไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณที่ใช้ แต่จะสูงขึ้นตามปริมาณที่ใช้จนถึงระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งหากใช้ในปริมาณที่สูงเกินกว่านี้ อาจทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (prooxidants)

α -tocopherol ที่สังเคราะห์ขึ้นเรียกว่า dl-α-tocopherol (Madhavi and Salunkhe, 1996) สามารถใช้ในอาหารได้ จัดเป็นสารที่มีความปลอดภัย (GRAS) มีค่า Acceptable Daily Intake (ADI) เท่ากับ 0.15-2 mg ต่อน้ำหนักตัวเป็น kg (Madhavi and Salunkhe, 1996) ประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ α -tocopherol และ tocopherols ผสมในผลิตภัณฑ์อาหารไม่เกิน 50 mg ต่อไขมัน 1 kg และไม่เกิน 300 mg ต่อไขมัน 1 kg ตามลำดับ (กระทรวงสาธารณสุข, สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2527)

จากการทดลองของ Jung และ Min (1990) โดยใช้ α, β, γ และ δ-tocopherols ที่ความเข้มข้น 0 , 100, 250, 500 และ 1000 ppm ในน้ำมันถั่วเหลือง ที่อุณหภูมิ 55°C พบว่าการใช้ α, γ และ δ-tocopherols ที่ความเข้มข้น 100, 250 และ 500 ppm ตามลำดับ มีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่สูงกว่าปริมาณที่กล่าว จะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดเร็วขึ้น ส่วน Evan และคณะ (2002) ได้สรุปผลการทดลองไว้ว่า การใช้ α, γ และ δ- tocopherols ผสมกันในน้ำมันถั่วเหลือง ที่อุณหภูมิ 65°C จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ที่ความเข้มข้น 340-660 ppm และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อใช้ tocopherol ผสมในปริมาณ 720-1900 ppm

สารออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Antimicrobial Agents) ในน้ำพริกเขียวหวาน

น้ำพริกเขียวหวาน มีเครื่องเทศเป็นส่วนประกอบอยู่หลายชนิด ได้แก่ พริกชี้ฟ้าสด ตะไคร้ ข่า หัวหอม กระเทียม และเครื่องเทศ (spices) ซึ่งเครื่องเทศเหล่านี้มีสารออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ สารต้านจุลชีพจากพืชเหล่านี้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางและได้มีการจัดแบ่งสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ในเครื่องเทศและสมุนไพรไว้เป็น 5 กลุ่ม (สุรัตนา อำนวยผล, 2537; Cowan, 1999) ได้แก่ phenolic acids และ polyphenols, terpenoids และ essential oils, alkaloids, lecithins และ polypeptides, และสารประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา กลุ่มแรก phenolic acids และ polyphenols มีฤทธิ์ในการ oxidize สารชีวโมเลกุลต่างๆ ในเซลล์ของจุลินทรีย์ สารในกลุ่มนี้แบ่งย่อยได้อีกเป็น 5 ชนิด ตามลักษณะของโมเลกุล ได้แก่ simple phenols และ phenolic acids, quinones, flavonoids, tannins และ coumarins สำหรับกลุ่มที่ 2 คือ terpenoids และ essential oils หรือสารให้กลิ่นในพืช กลไกการออกฤทธิ์ของสารกลุ่มนี้ยังไม่ทราบแน่ชัด กลุ่มที่ 3 คือ alkaloids ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายไนโตรเจนเบส คาดว่าสารกลุ่มนี้ออกฤทธิ์ยับยั้งโดยมีผลต่อการสังเคราะห์สาย DNA กลุ่มที่ 4 คือ lecithins และ polypeptides สารกลุ่มนี้สามารถทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดช่องของประจุหรือยับยั้งการยึดติดของเยื่อหุ้มเซลล์ และกลุ่มสุดท้าย คือ สารประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมา เช่น fructose จากน้ำ

cranberry และ blueberry สามารถจับกับ pathogenic *Eschericia coli* ที่ urinary tract ช่วยป้องกันการเกิดโรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบจากเชื้อ *E. coli* ได้ (Zafriri *et al.*, 1989)

เครื่องเทศที่เป็นองค์ประกอบในน้ำพริกแกง ได้แก่ พริกชี้ฟ้าสด หอมแดง กระเทียม ข่า ตะไคร้ มะกรูด รากผักชี กระชาย กระวาน กานพลู ลูกจันทน์เทศ/ดอกจันทน์เทศ อบเชยเทศ ยี่หร่า และพริกไทย ซึ่งมีสารประกอบสำคัญในเครื่องเทศ (นิจศิริ เรืองรังษี, 2542; สมศรี เจริญเกียรติกุล และคณะ, 2545; Shelef, 1983; Zaika, 1988; Cowan, 1999; Ozean and Erkmen, 2001) ดังนี้

พริกชี้ฟ้าสด (*Capsicum annuum* Linn.) มีสารประกอบ capsicum อยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย

หอมแดง (*Allium ascalonicum* Linn.) มีสารประกอบ methylpropyl disulfide, dipropyl trisulfide และ allyl propyl disulfide ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

กระเทียม (*Allium sativum* Linn.) มีสารประกอบ allicin และ diallyl trisulfide ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

ข่า (*Alpinia galanga* SW.) มีสารประกอบ cineol, camphor และ methyl cinnamate ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

ตะไคร้ (*Cymbopogon citratus* DC.) มีสารประกอบ citral, linalool และ eugenol ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

มะกรูด (*Citrus* hystrix DC.) มีสารประกอบ β-pinene, limonene และ sabinene ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

รากผักชี (*Coriandrum sativum* Vern.) มีสารประกอบ coriandrol และ linalool ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

กระชาย (*Boesenbergia pandurata* (Roxb.) Schltr.) มีสารประกอบ limonene, pinene, chalcone และ α-thujene ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

กระวาน (*Amomum krervanh* Pierre) มีสารประกอบ camphor, myrcene และ limonene ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

กานพลู (*Eugenia caryophyllus*) มีสารประกอบ eugenol ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

ลูกจันทน์เทศและดอกจันทน์ (*Myristica fragrans* Houtt) มีสารประกอบ myristic acid, safrole และ elemicin ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

อบเชยเทศ (*Cinnamomum verum* J.S. Presl) มีสารประกอบ cinnamaldehyde, eugenol และ benzaldehyde ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ราและยีสต์

ยี่หร่า (*Cuminum cyminum* Linn.) มีสารประกอบ cuminic aldehyde, cumene และ p-cymene ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

พริกไทย (*Piper nigrum* Linn.) มีสารประกอบ piperine และ monoterpenes ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กับ terpenoids และ alkaloids ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและรา

อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

อาหารมีการเสื่อมเสียโดยธรรมชาติในตัวนอกเหนือจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตและเก็บรักษา ดังนั้นภาวะที่ใช้ในการผลิต และการเก็บรักษาจึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคุณภาพในอาหาร โดยในช่วงเวลาการเก็บรักษานั้น

อาจเพียงหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งลักษณะมีการเปลี่ยนแปลง จนเข้าสู่ระดับที่ทำให้เกิดภาวะที่ยอมรับไม่ได้ ซึ่งที่ระดับดังกล่าวนี้ อาหารจะไม่เหมาะต่อการบริโภค หรือเรียกได้ว่าอาหารนั้นหมดอายุ (Singh, 1994)

ระหว่างการเก็บรักษา และกระจายสินค้า อาหารสัมผัสกับภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมี และชีวภาพต่าง ๆ อุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน และแสง ซึ่งต่างก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกลไกการทำงานของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น มีทั้งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ เคมีฟิสิกส์ และจุลินทรีย์ ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้นำไปสู่การเสื่อมเสียของอาหาร วิธีการทั่วไปในการประเมินอายุการเก็บของอาหารคือ วิเคราะห์ลักษณะคุณภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (Singh, 1994) แต่ส่วนใหญ่พบว่าการใช้ลักษณะคุณภาพอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวมักไม่พอ การประเมินต้องพิจารณาการเสื่อมเสียของอาหารโดยรวมซึ่งการศึกษาต้องใช้เวลานาน จึงมีวิธีหรือเทคนิคในการศึกษาอายุการเก็บรักษาแบบภาวะเร่ง (accelerated shelf life testing) ซึ่งเป็นหลักการจลนพลศาสตร์ทางเคมี (chemical kinetics) ซึ่งใช้ประมาณผลของปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแสง ที่มีต่ออัตราของปฏิกิริยาการเสื่อมคุณภาพ โดยการกำหนดให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในภาวะได้รับการควบคุม แล้วให้ปัจจัยภายนอกหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งปัจจัยในระดับที่สูงกว่าปกติ เพื่อเร่งอัตราการเสื่อมเสียให้เร็วขึ้น ซึ่งมีผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับในช่วงเวลาที่สั้นขึ้น ตัวอย่างเช่น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิเร่ง ซึ่งหมายถึง การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในอุณหภูมิที่สูงกว่าภาวะปกติที่ผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ ทั้งนี้เพื่อเร่งอัตราการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์นั้นให้เร็วขึ้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ อาทิ อาหารแช่เยือกแข็ง ซึ่งมีอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ภาวะปกติคือ -18°C ดังนั้นอุณหภูมิเร่งในการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งจึงมีค่าสูงกว่า -18°C เช่น 0, -5 และ -15°C เป็นต้น

เมื่อการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบต่างๆ ดำเนินต่อเนื่องกันไป โดยเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับความเร็ว อัตรา และจลนพลศาสตร์ ของปฏิกิริยา ดังสมการ $dC_A/dt = -kC_A$ (Singh, 1994) ก็สามารถหาอันดับ (n) ของปฏิกิริยาได้โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการศึกษาโดย

$n = 0$; $C_A - C_{A0} = -kt$ จากเขียนกราฟระหว่าง C_A กับ t

$n = 1$; $\ln C_A/C_{A0} = -kt$ จากเขียนกราฟระหว่าง $\ln C_A$ กับ t

$n = 2$; $1/C_A - 1/C_{A0} = -kt$ จากเขียนกราฟระหว่าง $1/C_A$ กับ t

เมื่อ C_A หมายถึง ปริมาณสารที่เกิดขึ้น/ลดลงจากปฏิกิริยา (amount of quality attribute)

k หมายถึง ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา (reaction rate constant)

t หมายถึง ระยะเวลาในการศึกษา

n = 0 หมายถึง อันดับปฏิกิริยาเป็นศูนย์ (zero order reaction)

n = 1 หมายถึง อันดับปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง (first order reaction)

n = 2 หมายถึง อันดับปฏิกิริยาเป็นสอง (second order reaction)

พารามิเตอร์ที่มักใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ Q_{10} ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ระหว่างอุณหภูมิใดๆ สองอุณหภูมิที่ห่างกัน 10 ^{o}C หากปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ สามารถหาได้จากสมการ (1)

$$Q_{10} = \frac{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } T^{o}C}{\text{อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ } (T+10)^{o}C} \qquad (1)$$

หากปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง (first order reaction) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์กับค่า E_a (activation energy) (Singh, 1994; Mizrahi, 2000) ได้จากสมการ (2)

$$\log Q_{10} = \frac{Ea}{2.303\,R}\left(\frac{10}{T(T+10)}\right) \qquad (2)$$

เมื่อ E_a หมายถึง พลังงานกระตุ้น (activation energy)

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) เท่ากับ 8.314 J/mole ^{o}K

T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature, ^{o}K)

และสามารถทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้จากสมการ Arrhenius ดังสมการต่อไปนี้

$$k = k_0 \exp(-E_a/RT) \qquad (3)$$

และ

$$t = \ln (C_0/C_{final}) k_0 \exp(-E_a/RT) \qquad (4)$$

เมื่อ k หมายถึง อัตราปฏิกิริยา

k_0 หมายถึง pre-exponential factor

E_a หมายถึง พลังงานกระตุ้น

R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.314 J/mole ^{o}K

T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (^{o}K)

C_0 หมายถึง ปริมาณสารที่มีอยู่ หรือเกิดขึ้น ณ จุดเริ่มต้น (initial value of a quality attribute)

C_{final} หมายถึง ปริมาณสารสุดท้ายที่ทำให้ตัวอย่างไม่เป็นที่ยอมรับ (a certain final level of quality attribute)

t หมายถึง อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ Labuza และ Schmidl (1985) ได้กล่าวว่า วิธีเร่งการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ใช้เพื่อคาดคะเนอายุของผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องรอถึง 12-24 เดือน โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์ การกำหนดเวลาสิ้นสุดของอายุการเก็บที่ภาวะเร่งจะใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสหรือการวัดปัจจัยทางคุณภาพ เช่น การวัดปฏิกิริยาเคมี การตรวจสอบทางกายภาพ เป็นต้น วิธีหนึ่งในการประมาณอายุการเก็บที่ภาวะเร่งคือ การใช้ Arrhenius model หรือ Q_{10} model โดยค่า Q_{10} หาได้จากอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างกัน 10 ^{o}C ดังสมการ (5) หรือหาได้จากอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างกัน 10^{o}C ดังสมการ (1)

$$Q_{10} = \frac{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ (T+10) } ^{o}\text{C}}{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ (T) } ^{o}\text{C}} \qquad (5)$$

เมื่อทราบค่า Q_{10} ของผลิตภัณฑ์แล้วสามารถนำค่า Q_{10} ไปใช้ในการทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้ และถ้ากรณีผลต่างของอุณหภูมิไม่เท่ากับ 10 ^{o}C ให้นำค่า Q_{10} ที่หาได้จากสมการ (5) หรือ (1) มาแทนค่าในสมการที่ (6) หรือ (7)

$$Q_{10}^{\Delta/10} = \frac{\text{อายุการเก็บที่ } (T_1) \ ^{o}\text{C}}{\text{อายุการเก็บที่ } (T_2) \ ^{o}\text{C}} \qquad (6)$$