

อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระเป็นสารเคมีที่ผ่านกระบวนการทำให้ไม่มีคู่ของอิเล็กตรอน หรือเป็นสารใดๆ ที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ (unpaired electron) มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจรของโมเลกุล ซึ่งอาจเป็นเศษหรือชิ้นส่วนของโมเลกุลที่แตกหัก (Valko *et al.*, 2004) อนุมูลอิสระมีทั้งที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า และอนุมูลอิสระในสถานะที่มีประจุไฟฟ้า หากเป็นประจุบวก เรียกว่า อนุมูลแคทไอออน (cation radical) ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น A^+ • ประจุลบเรียกว่าอนุมูลแอนไอออน (anion radical) ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น A^- • และอนุมูลที่มีประจุเป็นกลาง (neutral radical) ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น $A\cdot$ เนื่องจากอนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่อยู่ในโมเลกุล จึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในร่างกาย ทำลายสมดุลของระบบต่างๆ ภายในร่างกาย โดยการทำลายองค์ประกอบหลักของเซลล์ เช่น ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เสียหายและนำไปสู่การตายของเซลล์ (Halliwell, 1997) ทำลายดีเอ็นเอโดยไปจับกับหมู่ฟอสเฟตและน้ำตาลคือออกซิไรโบส อนุมูลอิสระยังสามารถแตกพันธะเปปไทด์ของโปรตีน ทำให้โปรตีนไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ (อัญชญา, 2544) โดยอนุมูลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุมูลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากอิเล็กตรอนเดี่ยวจะไม่เสถียรและพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนเดี่ยวอื่น อย่างไรก็ตามยังคงมีอนุมูลอิสระบางชนิดที่มีความเสถียร ไม่วินาการเกิดปฏิกิริยา สามารถคงสภาพอนุมูลอิสระได้นาน ตัวอย่างของอนุมูลอิสระที่มีความสำคัญในทางชีวภาพได้แก่ อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($O_2\cdot^-$) อนุมูลไฮดรอกซี ($\cdot OH$) อนุมูลอัลคอกซี ($RO\cdot$) อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซี ($HO_2\cdot$) (โอภา, 2549; Takebayashi *et al.*, 2007)

การเกิดอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระสามารถเกิดได้ 3 ทาง คือ

1. การแตกตัวของพันธะโควาเลนต์แบบโฮโมไลซิสภายในโมเลกุลปกติ ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนที่แตกตัวไปจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ไม่มีคู่ ดังสมการที่ 1
2. การสูญเสียอิเล็กตรอน 1 ตัว จากโมเลกุลปกติหรืออะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 2

3. การเพิ่มหรือเติมอิเล็กตรอน 1 ตัว ให้กับโมเลกุลปกติหรืออะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 3

สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 ดังกล่าวเกิดได้ยากในสภาวะหรือในระบบทางชีววิทยาทั่วไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วต้องการปัจจัยด้านพลังงานที่สูง แสงอัลตราไวโอเล็ตและการแผ่รังสี (Cheeseman and Slater, 1993)



สมการที่ 1



สมการที่ 2



สมการที่ 3

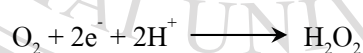
อนุมูลอิสระออกซิเจนและสารที่เกี่ยวข้องที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (oxygen free radical and Reactive Oxygen Species: ROS) (ตาราง 1)

อนุพันธ์อนุมูลอิสระของออกซิเจนเป็นอนุมูลอิสระที่มีความสำคัญมากที่สุดในการบวนการทางชีววิทยา ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดได้จากการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน 1 ตัว ออกไปและทำให้เกิดอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (สมการที่ 4)



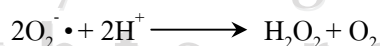
สมการที่ 4

การลดลงของอิเล็กตรอน 2 ตัว ของออกซิเจนจะทำให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สมการที่ 5)



สมการที่ 5

โดยทั่วไปแล้วไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดภายใต้กระบวนการทางชีววิทยา จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกันของซูเปอร์ออกไซด์ 2 โมเลกุล เพื่อที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจน (สมการที่ 6)



สมการที่ 6

แม้ว่าออกซิเจนเป็นแก๊สที่จำเป็นสำหรับมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แต่พบว่าออกซิเจนก็เป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต อนุมูลอิสระส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของออกซิเจน ไปยังโมเลกุลของน้ำ เรียกว่า reactive oxygen species หรือ ROS (วัลยาและพัชรี, 2542)

เนื่องจากสารตั้งต้นอนุมูลอิสระบางชนิดอาจผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นอนุมูลซึ่งรู้จักกันในชื่อปฏิกิริยา dismutation reaction ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องหรือถูกกระตุ้นโดยเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ใช่อนุมูลอิสระแต่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ reactive oxygen species (ROS) ซึ่งไม่ได้หมายถึงอนุมูลอิสระออกซิเจนเท่านั้น แต่รวมถึงอนุพันธ์ของสารประกอบออกซิเจนที่เกี่ยวข้องในการผลิตอนุมูลอิสระออกซิเจนอีกด้วย (Cheeseman and Slater, 1993)

อนุมูลอิสระไนโตรเจนและสารที่เกี่ยวข้องที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nitrogen free radical and Reactive Nitrogen Species: RNS) (ตาราง 1)

โครงสร้างของไนโตรเจนมีจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ 3 และ 5 เป็นธาตุที่มีความสำคัญทางชีวภาพสูงในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด อนุมูลไนโตรเจนที่สำคัญและมีบทบาทมากที่สุดคือ ไนตริกออกไซด์ ($\text{NO}\cdot$) ไนตริกออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ไม่ละลายน้ำ และเป็นอนุมูลที่ไม่มีประจุทำให้สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ทางเยื่อหุ้มเซลล์ได้ เมื่อไนตริกออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะได้ไนโตรเจนไดออกไซด์ ($\text{NO}_2\cdot$) ซึ่งเป็นแก๊สสีน้ำตาลและเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง

ในสิ่งมีชีวิตไนตริกออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ citrulline จาก L-arginine โดยการกระตุ้นของเอนไซม์ไนตริกออกไซด์ซินเทส (nitric oxide synthase: NOS) (Moncada and Palmer, 1990) ถึงแม้ว่าไนตริกออกไซด์จะมีบทบาทด้านการส่งสัญญาณโดยทำหน้าที่เป็น secondary messenger และเป็นโมเลกุลที่ทำหน้าที่ยับยั้งการเพิ่มจำนวนของ lipid peroxide ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่เข้าทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของพืช (Rubbo *et al.*, 1996) แต่ปริมาณไนตริกออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้โปรตีนที่มีเหล็กและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบเสียหาย (Moncada and Higgs, 1993) อีกทั้งยังกระตุ้นให้เกิด ADP-ribosylation ของโปรตีนและเข้าทำลาย DNA โดยตรงอีกด้วย (Brune *et al.*, 1994.) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มจากการที่ RNS จะให้หมู่นิโตรเจนแก่หมู่นิโทออล (-SH) ของ กลูตาไทโอน (GSH) ได้เป็นสารประกอบ S-nitrosoglutathione (GS-NO) หรือทำปฏิกิริยาให้หมู่นิโตรเจนแก่หมู่นิโทออลในโปรตีน ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนไป รีเซพเตอร์และเอนไซม์ทำงานไม่เป็นปกติ ส่งผลให้กลไกต่างๆ ภายในร่างกายบกพร่อง นอกจากนี้ในสภาวะที่ร่างกายมีปริมาณไนตริกออกไซด์และอนุมูลซูปเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นเปอร์ออกซีไนเตรท (ONOO) ซึ่งมีความเป็นพิษและอันตรายมากกว่า (Cuddihy *et al.*, 2008) โดยกระบวนการทำให้เซลล์ผิดปกติแสดงดังภาพ 1

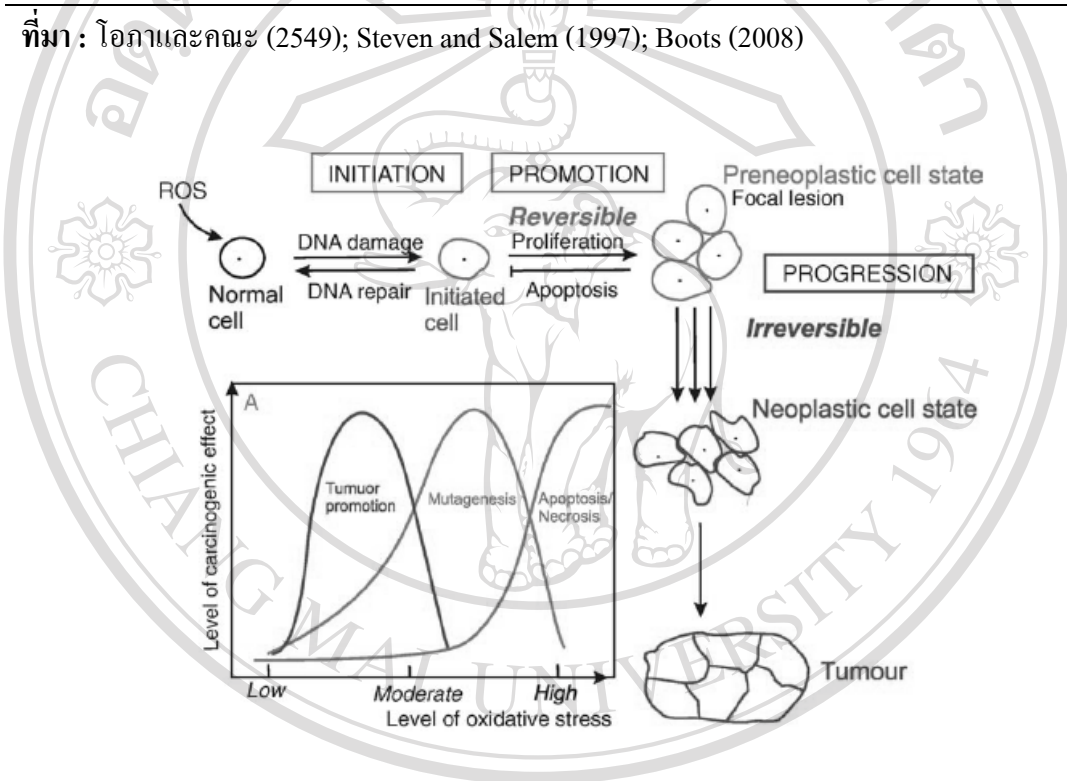
ตาราง 1 ROS, RNS และอนุมูลอิสระอื่นที่มีความสำคัญทางชีวภาพ

ชนิดอนุมูล	สัญลักษณ์	ตัวอย่างสารที่เกี่ยวข้อง
Reactive Oxygen Species	ROS, RS	
Alkoxyl	RO•	Organic peroxides, ROOH
Carbon dioxide	CO ₂ •	Peroxynitrous acid, ONOOH
Carbonate	CO ₃ •	Peroxynitrite, ONOO ⁻
Hydroperoxyl	HO ₂ •	Hypochlorous acid, HOCl
Hydroxyl	HO•	Hypobromous acid, HOBr
Peroxyl	RO ₂ •	Singlet oxygen, ¹ ΔG _{O₂}
Superoxide, Superoxide anion	O ₂ •	H ₂ O ₂ , O ₃
Reactive Nitrogen Species	RNS	
Free radicals		
Nitric oxide (monoxide)	NO•	Nitrous acid, HNO ₂
Nitrogen dioxide	NO ₂ •	Nitrosyl cation, NO ⁺ , Nitroxyl anion NO ⁻ , Peroxynitrite, ONOO ⁻
Non radicals		
Alkyl peroxyntrites	RO ₂ NO ⁻	
Dinitrogen trioxide	N ₂ O ₃	
Dinitrogen tetroxide	N ₂ O ₄	
Dinitrogen pentoxide	N ₂ O ₅	
Nitrocarbonate	O ₂ NOCO ₂ ⁻	
Nitrosoperoxy carbonate	ONO ₂ CO ₂ ⁻	
Peroxyntrite	ONO ₂ ⁻	
Reactive Chlorine Species	RCS	
Atomic chlorine	Cl	Hypochlorous acid, HOCl Nitryl (nitronium) chloride, NO ₂ Cl, Chloramines, Chlorine gas and Cl ₂

ตาราง 1 ROS, RNS และอนุมูลอิสระอื่นที่มีความสำคัญทางชีวภาพ (ต่อ)

ชนิดอนุมูล	สัญลักษณ์	ตัวอย่างสารที่เกี่ยวข้อง
Miscellaneous		
Thiyl radical	RS•	
Hydrogen atom	H•	
Carbon-centered radicals	e.g. CCl ₃ •	

ที่มา : โอภาและคณะ (2549); Steven and Salem (1997); Boots (2008)



ภาพ 1 ระยะเวลาการเกิดเซลล์ที่ผิดปกติกับปริมาณอนุมูลอิสระ

ที่มา : Valko et al. (2006)

สารต้านอนุมูลอิสระในธรรมชาติ

สารต้านอนุมูลอิสระหรือแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) คือสารเคมีที่ทำหน้าที่ชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารตั้งต้น (Halliwell, 1999 and Shahidi, 2002) ในที่นี้รวมถึงสารที่สามารถยับยั้งและควบคุมอนุมูลอิสระไม่ให้ไปกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงช่วยยับยั้งอนุมูลอิสระไม่ให้ทำลายของค์ประกอบของเซลล์ (วัลยาและพัชรี, 2542) สารต้านอนุมูลอิสระในธรรมชาติไม่ได้เป็นเพียงสารประกอบทางเคมีที่พืชสร้างขึ้นเท่านั้น แต่รวมถึงเอนไซม์ที่

เกี่ยวข้องกับตัวอย่างเช่น superoxide dismutase, catalase และ peroxidase เป็นต้น (Halliwell, 1999) จากการศึกษาทางระบาดวิทยาจำนวนมากยืนยันถึงการลดอัตราเสี่ยงและเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและหัวใจ รวมถึงโรคอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอนุมูลอิสระที่เป็นผลมาจากการบริโภคผักและผลไม้ โดยในปัจจุบันพบว่าสารประกอบในกลุ่มฟีนอลเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระ (Rice-Evans *et al.*, 1996; Tavarini *et al.*, 2008)

สารต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้ (Hudson, 1990)

1. Primary antioxidant

สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ได้แก่สารประกอบฟีนอลิก (phenolic substance) ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังรวมถึงสารโทโคฟีรอลธรรมชาติและสังเคราะห์ (natural and synthetic tocopherol), gallate, butylated hydroxyanisole (BHA), tertiary butyl hydroquinone (TBHQ) และอื่นๆ ซึ่งสารในกลุ่มดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน

2. Oxygen scavenger

สารในกลุ่มนี้ได้แก่ ascorbic acid หรือวิตามินซี palmitate, erythorbic acid (isoascorbic acid) และ sodium erythorbate เป็นต้น สารในกลุ่มนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเป็นการช่วยกำจัดออกซิเจนในระบบปิดได้

3. Secondary antioxidant

สารในกลุ่มนี้ได้แก่ dilauryl thiopropionate และ thiopropionic acid ทำหน้าที่สลายโมเลกุลของ lipid hydroperoxide ให้เป็นสารที่มีความเสถียร

4. Enzymic antioxidant

สารในกลุ่มนี้ได้แก่เอนไซม์ต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็น primary antioxidant enzyme และ ancillary antioxidant enzyme สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระของออกซิเจน โดยเฉพาะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

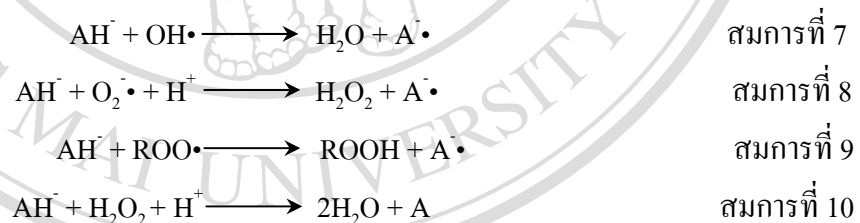
5. Chelating agent หรือ sequestrant

สารในกลุ่มนี้เช่น กรดซิตริก กรดอะมิโน ethylenediaminetetra-acetic acid (EDTA) เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ไปจับกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก และทองแดง ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่ส่งเสริมและเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid peroxidation) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร

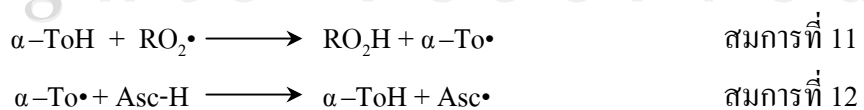
สารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ

1. วิตามินซี หรือ Ascorbic acid

เป็นสารที่จำเป็นต่อร่างกายที่ต้องได้รับจากอาหารเท่านั้นเนื่องจากร่างกายไม่สามารถสร้างหรือสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้ เป็นสารประกอบที่มีสีขาว ลักษณะคล้ายผลึก ละลายน้ำได้ มีหน้าที่สำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ในร่างกาย เช่น การสร้างคอลลาเจนซึ่งเป็นโปรตีนส่วนหนึ่งของโครงสร้างกระดูกมนุษย์ และทำหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ของปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่างๆ (Ames *et al.*, 1981) วิตามินซีมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่ละลายน้ำได้ เช่น peroxy radical ($RO_2\cdot$), nitronium radical ($NO_2\cdot$), thiyl radical, sulfenyl radical, singlet oxygen และ hypochlorous acid ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเหล่านี้แล้วจะให้ผลิตภัณฑ์เป็น semi-dehydroascorbate ($A\cdot$) และ dehydroascorbate (A) ซึ่งเป็นอนุมูลที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือวิตามินซีสามารถชะลอการเกิดออกซิเดชันได้ (Halliwell *et al.*, 1995) ดังตัวอย่างที่กำหนดให้ AH คือโมเลกุลของวิตามินซีที่ทำปฏิกิริยากับ hydroxyl radical ($OH\cdot$), superoxide anion ($O_2^-\cdot$) และ peroxy radical $ROO\cdot$ ดังสมการที่ 7-10 ตามลำดับ แล้วเปลี่ยนโครงสร้างเป็น semi dehydroascorbate ($A\cdot$) และ dehydroascorbate (A) ซึ่งเป็นอนุมูลที่ไม่ไวในการทำปฏิกิริยา (inactive radicals) ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ออกซิเดชันเกิดได้ช้าลง



นอกจากวิตามินซีจะสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเพื่อชะลอการเกิดออกซิเดชันแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหรือตัวส่งเสริมปฏิกิริยาย้อนกลับของวิตามินอี (α -tocopherol, ToH) โดยทำให้อนุมูล α -tocopherol ($To\cdot$) เปลี่ยนกลับไปเป็น α -tocopherol (ToH) เพื่อทำหน้าที่ในการต้านอนุมูลอิสระต่อไปได้อีก (Kagan *et al.*, 1992; Washko *et al.*, 1992) ดังสมการที่ 11 และ 12



วิตามินซีสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid peroxidation) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้ โดยเข้าจับกับอนุมูล phenoxyl และ glutathionyl และเมื่อวิตามินซีทำงานร่วมกับ reduced glutathione (GSH) จะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น (Cuddihy *et al.*, 2008)

2. กรดยูริก (Uric acid)

กรดยูริกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเบส purine ซึ่งได้สาร xanthine ในมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีพัฒนาการสูง โดยการสลายตัวของเบส guanine จะทำให้เกิด xanthine โดยตรง ในขณะที่การสลายตัวของเบส adenine จะให้ผลิตภัณฑ์เป็น hypoxanthine ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนไปเป็น xanthine โดยเอนไซม์ xanthine oxidase (Strazzullo and Pugi, 2007)

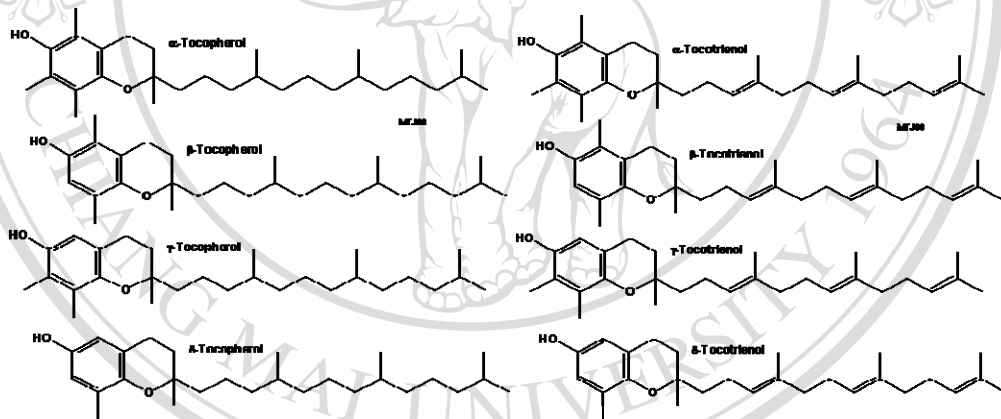
กรดยูริกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญที่พบในกระแสเลือด (Culleton *et al.*, 1999; Niskanen *et al.*, 2004) อัตราการหมุนเวียนของกรดยูริกในร่างกายที่สูงสามารถช่วยป้องกันการเกิดโรคเมรังค์และชะลอการชราภาพของเซลล์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมมนุษย์จึงมีอายุยืนกว่าสัตว์ที่มีพัฒนาการต่ำกว่า (Rose and Bode, 1993) ถึงแม้ว่ากรดยูริกจะถูกเข้าใจว่าเป็นสารที่ร่างกายขับออกมาหรือเป็นของเสียจากกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ แต่ความจริงแล้วกรดยูริกมีประโยชน์ต่อร่างกายเทียบเท่ากับวิตามินซีในฐานะสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถละลายน้ำได้ พบว่า กรดยูริกมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จะถูกดูดซึมกลับไปใช้ใหม่จากปัสสาวะ (Maples and Mason, 1988; Capasso *et al.*, 2005)

กรดยูริกทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยการเปลี่ยนตำแหน่งไอออนของอนุมูลที่เป็นโลหะต่างๆ ทำให้มีความไวในการเข้าทำปฏิกิริยาลดลง (Glantzounis *et al.*, 2005) นอกจากนี้กรดยูริกยังรวมตัวกับ singlet oxygen, $RO_2\cdot$ และ HOCl แต่เมื่อใดก็ตามที่กรดยูริกรวมตัวกับ $HO\cdot$ หรือ peroxy radicals จะทำให้เกิดอนุมูลกรดยูริกซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายระดับเซลล์ และเป็นอันตรายต่อระบบประสาท (Aruoma and Halliwell, 1989) หรือปริมาณกรดยูริกในร่างกายที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจได้ (Lippi *et al.*, 2008) ดังนั้นกรดยูริกจึงก่อให้เกิดทั้งผลดีและผลเสียต่อเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ แต่ในท้ายที่สุดแล้วอนุมูลอิสระกรดยูริกที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกับ $HO\cdot$ หรือ peroxy radicals จะถูกหยุดปฏิกิริยาถูกโซ่โดยการรวมตัวกับวิตามินซี (Kaur and Halliwell, 1990)

3. วิตามินอี (Vitamin E)

วิตามินอีเป็นวิตามินที่ละลายในไขมัน เดิมชื่อว่าวิตามินป้องกันการเป็นหมัน (antisterility vitamin) เนื่องจากเป็นสารที่จำเป็นสำหรับการตั้งครรภ์ของหนูเพศเมีย ปัจจุบันมีชื่อว่าโทโคฟีรอล (tocopherol) วิตามินอีมีโครงสร้างของโมเลกุลทั้งหมด 8 โครงสร้างที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ โทโคฟีรอลและโทโคไตรเอนอล (tocotrienol) และแต่ละกลุ่มแยกออกเป็น 4 ชนิดย่อย คือ แอลฟา (α -) เบต้า (β -) แกมมา (γ -) และเดลต้า (δ -) ซึ่งการเรียกชื่อจะขึ้นอยู่กับจำนวนและตำแหน่งของหมู่เมทิลที่เชื่อมต่อกับวงแหวนโครแมน (chromane ring) (Basu *et al.*, 1999) ดังภาพ 2

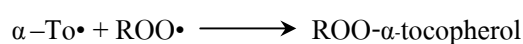
วิตามินอีทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระ lipid peroxides หรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยา lipid peroxidation ของไขมันที่เชื่อมหุ้มเซลล์ (Steven and Salem, 1997) รักษาสภาพหรือระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายให้ทำงานเป็นปกติ และยับยั้งการเจริญเติบโตของก้อนเนื้อที่ผิดปกติ (Kim *et al.*, 2007)



ภาพ 2 โครงสร้างโมเลกุลของวิตามินอี

ที่มา : Ivanov and Aitzetmüller (1998)

วิตามินอีทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ peroxy ดังสมการที่ 11 หลังจากนั้นอนุมูลวิตามินอี (α -To \cdot) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ peroxy ตัวอื่น ทำให้เกิดสารที่มีความเสถียร และปฏิกิริยาถูกใช้การออกซิเดชันของไขมัน หยุดลงดังสมการที่ 13



สมการที่ 13

4. ยูบิควิโนน (Ubiquinone)

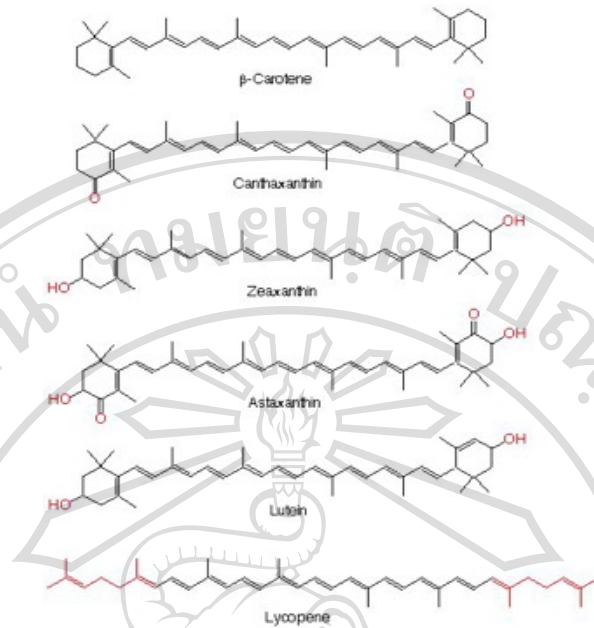
Ubiquinone หรือ 2, 3-dimethoxy-5-methyl-6-decaprenylbenzoquinone หรือเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ coenzyme Q₁₀ (CoQ₁₀) ubiquinone เป็นสารประกอบที่ละลายในไขมัน มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระหว่าง NADH-Q reductase กับ cytochrome reductase ของกระบวนการหายใจที่เกิดในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย (Folkers and Yamamura, 1981; James *et al.*, 2004) บทบาทหรือหน้าที่ของ ubiquinone สำหรับการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระคือส่งเสริมการสร้างวิตามินอีจากอนุมูลของวิตามินอีเอง ในขณะที่เดียวกัน ubiquinone เป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยา lipid peroxidation จากการเข้าทำลายของอนุมูลอิสระ peroxy ที่เยื่อหุ้มส่วนต่างๆ ภายในเซลล์ (Takada *et al.*, 1982) ป้องกันและบรรเทาโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน (Gille *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันสภาวะหัวใจล้มเหลวสำหรับผู้ป่วยโรคหัวใจและความดันโลหิตสูงอีกด้วย (Pepe *et al.*, 2007)

5. ไธออล ไดซัลไฟด์ และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง (Thiols, Disulfides and related compounds)

สารจำพวก thiols ตัวอย่างเช่น reduced glutathione หรือสารจำพวก disulfides ตัวอย่างเช่น oxidized glutathione และ mixed disulfides เป็นต้น และสารประกอบอื่นที่เกี่ยวข้องเช่น lipoamide, taurine, homocysteine และ *N*-acetylcysteine สารประกอบดังกล่าวมานี้มีคุณสมบัติด้านและควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระทั้งสิ้น (Steven and Salem, 1997)

6. แคโรทีนอยด์ เรตินอยด์ และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง (Carotenoids, Retinoids and related compounds)

แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่มีหน้าที่ช่วยคลอโรฟิลล์ในการดักจับพลังงานแสงในกระบวนการสังเคราะห์แสง พบมากในผักหรือผลไม้ที่อยู่ในระยะแก่หรือสุกแล้ว เนื่องจากในระยะนี้ผักและผลไม้มีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์มากขึ้น ประกอบกับการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ทำให้เกิดการสะสมแคโรทีนอยด์ในคลอโรพลาสต์มากตามลำดับ (Thomas-Barberan and Robins, 1997) แคโรทีนอยด์เป็นกลุ่มของสารสีที่ให้สีแดง ส้ม และสีเหลือง พบได้ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ใบ ผล และดอก (Lui *et al.*, 2008) แคโรทีนอยด์ประกอบด้วยโครงสร้างหลักที่เรียกว่า tetraterpene skeleton ซึ่งอาจประกอบไปด้วยวงแหวนคาร์บอน 5 หรือ 6 อะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของแคโรทีนอยด์ ดังภาพ 3



ภาพ 3 โครงสร้างของแคโรทีนอยด์บางชนิด

ที่มา : Britton (1995)

เบต้าแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสร้างวิตามินเอหรือเรตินอล ซึ่งพบมากในแครอท และผักหลายชนิด เบต้าแคโรทีน 1 โมเลกุล สามารถให้วิตามินเอได้ 2 โมเลกุล โดยผ่านการสลายพันธะคู่ที่กึ่งกลาง โครงสร้างของโมเลกุลโดยเอนไซม์ carotene deoxygenase แล้วร่างกายจะเก็บไว้ที่ตับในรูปของกรดไขมันเอสเทอร์ เช่น palmate เป็นต้น (Cadenas and Packer, 1996; Steven and Salem, 1997) วิตามินเอและเรตินอลชนิดอื่นๆ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความสำคัญ มีบทบาทในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์ และช่วยในการเปลี่ยนแปลงหน้าที่การทำงานของเซลล์ (Gelain *et al.*, 2008)

มีรายงานว่าเบต้าแคโรทีน ลิวทีน และไลโคปีนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง (Bryan *et al.*, 1991; Ozhogina and Kasaikina, 1995) เนื่องจากเบต้าแคโรทีนเมื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระแล้ว โมเลกุลของเบต้าแคโรทีนจะมีเรโซแนนซ์ที่เสถียรมาก (Cadenas and Packer, 1996) นอกจากนี้เมื่อเบต้าแคโรทีนทำปฏิกิริยากับอนุมูลที่มีคาร์บอนเป็นศูนย์กลาง (carbon-centered radicals) หรืออนุมูลเปอร์ออกซิลจะทำให้ค่าอัตราคงที่ปฏิกิริยาสูงถึง $1.0 \times 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (MacCrehan and Schonberger, 1987) Lui *et al.* (2008) รายงานว่าไลโคปีนเมื่อทำงานร่วมกับวิตามินอีจะมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น แต่เมื่อไลโคปีนทำงานร่วมกับเบต้าแคโรทีนจะมีประสิทธิภาพลดลง 3 เท่า

เบต้าแคโรทีนและเรตินอลมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยา lipid peroxidation แต่ทั้งนี้จะถูกควบคุมโดยระบบของวิตามินอี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อในสภาวะที่พืชมีการผลิตวิตามินอีต่ำ หรืออยู่ในสภาวะ oxidative stress เป็นเวลานาน เบต้าแคโรทีนและเรตินอลจะเข้ามามีส่วนช่วยยับยั้งการเกิด lipid peroxidation มากขึ้น (Burton and Ingold, 1983; Scott *et al.*, 1993; Aeschbach *et al.*, 1994)

7. สารประกอบฟีนอล (Phenolic compound)

สารประกอบฟีนอลพบแพร่หลายมากในพืชทั้งชนิดและปริมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พันธุ์ อายุ และสภาพแวดล้อม โครงสร้างทางเคมีหลักของสารประกอบฟีนอลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนซึ่งมีกลุ่ม hydroxy (OH) เกาะอยู่กับคาร์บอนตำแหน่งหนึ่งหรือมากกว่า และอาจมีกลุ่มเคมีอื่นๆ เกาะกับคาร์บอนอื่นๆ ด้วย (จริงแท้, 2550) สารประกอบฟีนอลแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

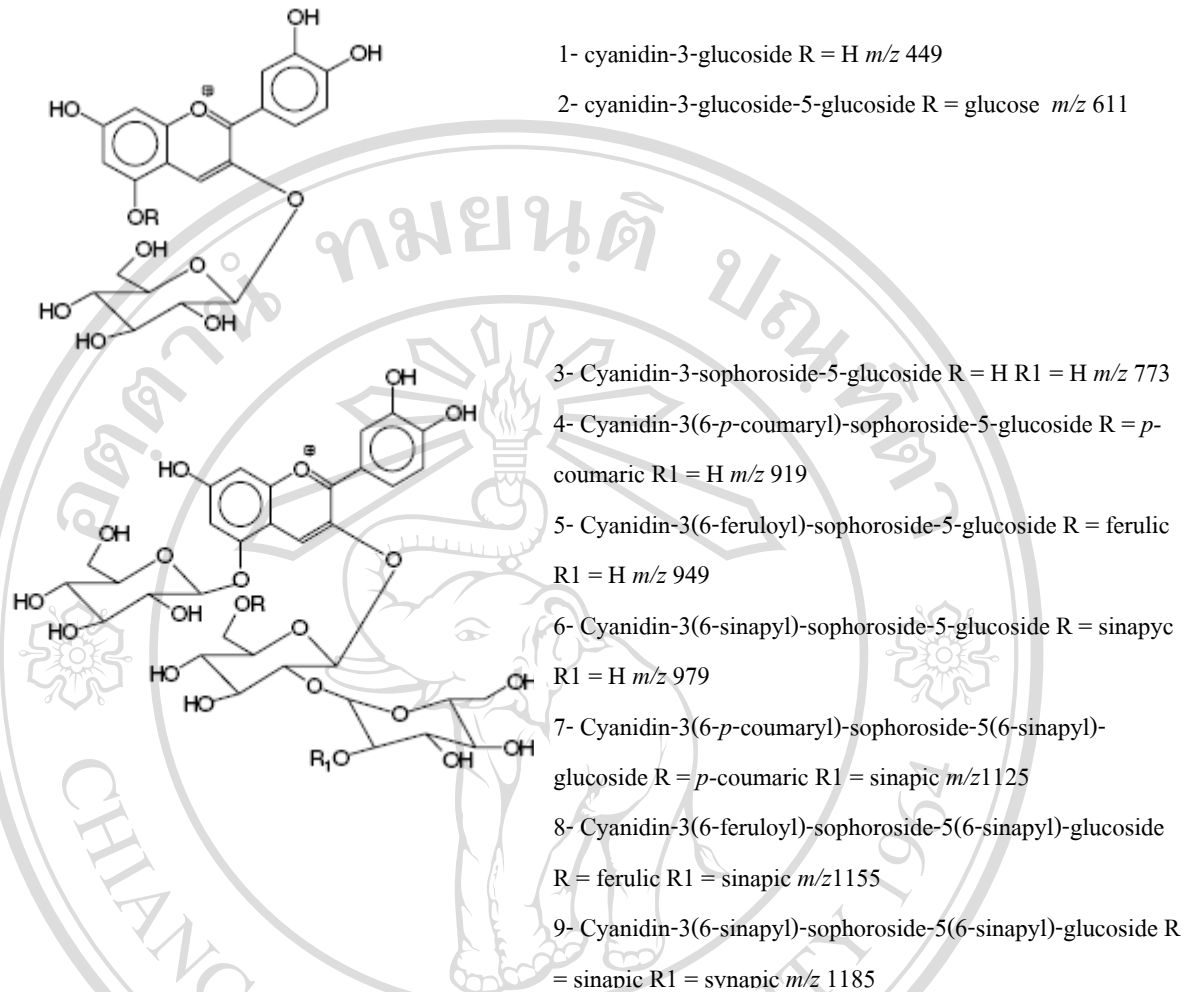
7.1 สารประกอบพื้นฐานที่เป็นสารตั้งต้นของเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ได้แก่ ฟีนอล catechol และ cresol สำหรับ catechol นั้นนิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดสีน้ำตาลหรือการศึกษาถึงเอนไซม์ PPO ในปฏิกิริยา diphenol oxidation เพราะสารตั้งต้นของเอนไซม์ PPO ในพืชต่างๆ มักมีโครงสร้างบางส่วนคล้ายกับ catechol

7.2 อนุพันธ์ของ benzoic acid เช่น gallic acid, syringic acid และ vanillic acid

7.3 อนุพันธ์ของ cinnamic acid เช่น sinapic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid และ chlorogenic acid

7.4 Tyrosine เป็นกรดอะมิโน aromatic และเมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วได้เป็น 3,4-dihydroxyphenylalanine (DOPA) ซึ่งเป็น diphenol อย่างหนึ่ง (Skiba and Mullin, 2008)

7.5 สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ ซึ่งได้แก่ แอนโทไซยานิน และฟลาโวนอล (Maisuthisakul *et al.*, 2005) ทั้งนี้อนุพันธ์ของ cinnamic acid อาจจัดเข้าอยู่ในกลุ่มนี้ได้ สารในกลุ่มนี้โดยเฉพาะฟลาโวนอล เช่น quercetin, mericetin และ kaempferol เป็นฟลาโวนอลที่พบบ่อยและมักพบว่าเกาะอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลหรือ glycosylated flavonoids (Giusti and Wrolstad, 2003; Boots *et al.*, 2008) ดังภาพ 4



ภาพ 4 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของแอนโทไซยานินที่เกาะอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลในกะหล่ำปลีสีม่วง

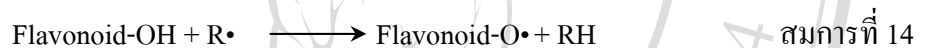
ที่มา : Scalzo *et al.* (2008)

สารประกอบฟีนอลทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และกำจัดออกซิเจนที่อยู่ในรูปแอกทีฟ (ROS) ด้วยหน้าที่ต่างๆ ดังกล่าวจึงทำให้สารประกอบฟีนอลเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญชนิดหนึ่งที่พบได้ทั่วไปในพืชผักและผลไม้ (Rice-Evans, 1996; Malenčić *et al.*, 2007; Padda and Picha, 2008)

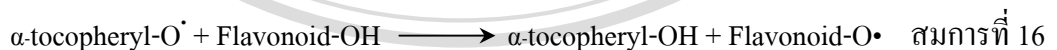
มีรายงานว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความสามารถด้านออกซิเดชันเมื่อทำการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดย 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity assay และ 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS⁺) assay (Chanasut and Rattanapanone, 2008) กลไกในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลประกอบด้วย 3 กลไกหลัก ได้แก่ (โอภา, 2549)

7.5.1 เป็นสารคีเลต (chelating agent) โดยเฉพาะสารพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างเป็น *O*-dihydroxyphenol ทำหน้าที่จับหรือสร้างพันธะกับโลหะหนัก เช่น ทองแดง และเหล็ก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการสร้าง รวมทั้งปฏิกิริยาถูกโซ่ของอนุมูลอิสระ

7.5.2 เป็นสารต้านออกซิเดชันโดยหยุดปฏิกิริยาถูกโซ่ (chain breaking antioxidant) ในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระเช่น lipid alkoxyl และ peroxy radicals เป็นต้น โดยทำหน้าที่เป็นตัวให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลดังกล่าวอย่างสมการที่ 14 หลังจากที่ถูกออกซิไดซ์แล้วจะได้อนุมูลของฟลาโวนอยด์ฟีนอกซิล ซึ่งเป็นอนุมูลที่มีความเสถียรมากกว่า



7.5.3 ทำหน้าที่ regenerates วิตามินอี (α -tocopherol) โดยจะทำหน้าที่รีดิวซ์อนุมูล α -tocopheryloxy กลับไปเป็น α -tocopherol เหมือนเดิม หรืออีกนัยหนึ่งคือช่วยในการคืนสภาพการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของวิตามินอี ดังสมการที่ 15 และ 16



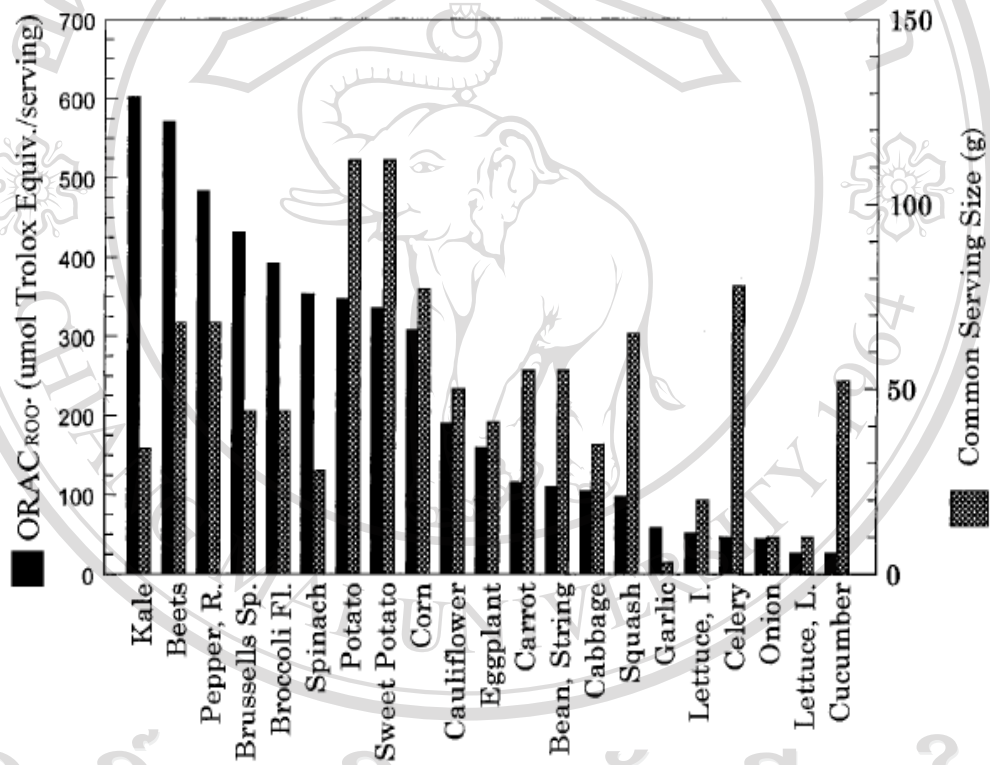
ผักสดเป็นแหล่งของวิตามิน แร่ธาตุ สารต้านอนุมูลอิสระ และสารสีต่างๆ ซึ่งผักหนึ่งหน่วย การบริโภคให้พลังงานต่ำและมีไขมันอิ่มตัวน้อย โดยกรมวิชาการเกษตรประเทศสหรัฐอเมริกาได้ สรุปคุณค่าทางอาหารที่พบในผัก ดังตาราง 2

ตาราง 2 คุณค่าทางอาหารของผักสดรวม (mixed vegetables) ที่ไม่ผ่านกระบวนการทำอาหารหรือแปรรูป

สารอาหาร	ปริมาณต่อ 100 กรัม	หน่วย	สารอาหาร	ปริมาณต่อ 100 กรัม	หน่วย
น้ำ	82.08	g	วิตามินบี 6	0.096	mg
พลังงาน	64	kcal	กรดโฟเลต	29	mcg
โปรตีน	3.33	g	วิตามินเอ	5078	IU
ไขมัน	0.52	g	กรดไขมันอิ่มตัว	0.098	g
เถ้า	0.60	g	กรดไขมันไม่อิ่มตัว	0.235	g
คาร์โบไฮเดรต	13.46	g	ทริปโตเฟน	0.034	g
ใยอาหาร	4.0	g	ทรีโอนีน	0.133	g
แคลเซียม	25	mg	ไอโซลิวซีน	0.162	g
เหล็ก	0.95	mg	ลิวซีน	0.221	g
แมกนีเซียม	24	mg	ไลซีน	0.198	g
ฟอสฟอรัส	59	mg	เมไทโอนีน	0.040	g
โพแทสเซียม	212	mg	ฟีนิลอลานีน	0.139	g
โซเดียม	47	mg	ไทโรซีน	0.086	g
สังกะสี	0.45	mg	วาเลีน	0.174	g
ทองแดง	0.093	mg	อะจินีน	0.225	g
แมงกานีส	0.244	mg	ฮิสทีดีน	0.085	g
ซีเลเนียม	0.4	mcg	อลานีน	0.143	g
วิตามินซี	10.4	mg	กรดแอสปาทิก	0.353	g
ไทอามีน	0.122	mg	กรดกลูตามิก	0.455	g
ไรโบฟลาวิน	0.085	mg	ไกลซีน	0.121	g
ไนอาซิน	1.252	mg	ซีรีน	0.158	g

ที่มา : USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 21 (2008)

ตัวอย่างคุณค่าทางอาหารในผัก ได้แก่ ผักตระกูล Cruciferae และ Alliaceae มีสารประกอบ sulforaphane, selenium, folic acid, vitamin B-12, vitamin D, chlorophyll, carotenoids และ vitamin C สารประกอบเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง (Donaldson, 2004) มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดเซลล์มะเร็งทุกชนิด ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การบริโภคผักสดเป็นประจำสามารถลดอัตราเสี่ยงของการเกิดมะเร็งได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ (Block *et al.*, 1992; Tavani and Vecchia, 1995; Donaldson, 2004) ดังภาพ 6 ซึ่งแสดงตัวอย่างความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระเปอร์ออกซิลของผักบางชนิด



ภาพ 6 ตัวอย่างปริมาณการบริโภคผักบางชนิดต่อความสามารถในการจับอนุมูลอิสระเปอร์ออกซิล

ที่มา : Cao *et al.* (1996); United State Department of Agriculture (1996)

การจำแนกชนิดของผัก (Edmond *et al.*, 1957)

ผัก หมายถึง ผลผลิตทางพืชสวน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพืชล้มลุก มีบางชนิดที่เป็นพืชยืนต้นและเป็นไม้เนื้ออ่อน ส่วนที่นำมาใช้บริโภคเป็นอาหารเป็นส่วนของราก หัว ลำต้น ใบ ดอกอ่อน เมล็ดอ่อน ผลอ่อน และผลแก่ ส่วนของพืชเหล่านี้มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ในระดับสูงและเป็นแหล่งของวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ ที่จำเป็นต่อร่างกาย ผักนิยมนบริโภคสดหรือนำไปประกอบเป็นอาหาร ผักส่วนใหญ่จะเก็บรักษาได้ในระยะเวลาสั้น มีผักเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถเก็บรักษาได้นาน

การจำแนกผักออกเป็นกลุ่มทำได้หลายวิธีได้แก่

- ก. การจำแนกทางพฤกษศาสตร์ (เช่น ผักตระกูลกะหล่ำ ตระกูลแตง ตระกูลมะเขือ ตระกูลถั่ว)
- ข. การจำแนกตามอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต (เช่น ผักฤดูร้อน ผักฤดูหนาว)
- ค. การจำแนกตามอายุของการปลูก ได้แก่ พืชปีเดียวหรือพืชล้มลุก (annual) พืชข้ามปี (biennial) และพืชยืนต้น (perennial)
- ง. การจำแนกตามความต้องการน้ำ (เช่น ผักต้องการน้ำมาก ผักต้องการน้ำน้อย)
- จ. การจำแนกตามส่วนของพืชที่บริโภคได้ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก และผล

การจำแนกผักตามส่วนของที่บริโภคได้ แบ่งออกเป็นดังนี้

1. ราก

ผักที่บริโภค ราก เป็นส่วนของรากแก้วที่เปลี่ยนไปทำหน้าที่สะสมอาหาร เช่น แครอท บีท แรดิช เทอร์นิพ ซัลซิไฟ (salsify) และรูตาบากา (rutabaga) ผักบางชนิดเป็นส่วนของรากที่ทำหน้าที่สะสมอาหาร เช่น มันเทศ เป็นต้น

2. ลำต้น

ผักที่บริโภค ลำต้น ได้ มีทั้งชนิดลำต้นใต้ดินและลำต้นเหนือดิน พวกที่เป็นลำต้นเหนือดิน เช่น หน่อไม้ฝรั่ง กะหล่ำปลม และผักกาดหอมชนิดต้น (stem lettuce) พวกที่เป็นลำต้นใต้ดินชนิดที่เป็นหัว (tuber) ได้แก่ มันฝรั่ง และเยรูซาเลมอาร์ติโชก (Jerusalem artichoke) ส่วนลำต้นใต้ดินชนิดที่เป็นหัว (corm) ได้แก่ เผือก เป็นต้น

3. ใบ

ผักที่บริโภค ใบมีมากมายหลายชนิด มีทั้งใบที่เจริญเป็นใบจริง เช่น ผักกาดหอม กะหล่ำปลี เซเลอรี ผักกาดขาว ผักคะน้า ชิโครี (chicory) และเอนไดว์ (endive) ส่วนผักที่บริโภคใบอีกประเภทหนึ่งมีก้านใบแผ่ขยายเป็นที่สะสมอาหาร เรียกว่า bulb เช่น หอมหัวใหญ่ กระเทียม และหอมแดง เป็นต้น

4. ดอกอ่อน

ผักที่บริโภคดอกอ่อน เช่น กะหล่ำดอก บรอกโคลี และอาร์ติโชค

5. ผล

ผักที่บริโภคผลมีหลายชนิดด้วยกัน มีทั้งที่บริโภคผลอ่อนและผลแก่ ผักที่บริโภคผลอ่อน เช่น ถั่วลันเตา ถั่วแขก แดงกวาง กระเจี๊ยบ ข้าวโพดฝักอ่อน มะเขือ แดงโม และซูกินี ส่วนผักที่บริโภคผลแก่หรือผลสุก เช่น ฟักทอง แดงโม แดงเทศ มะเขือเทศ และพริก เป็นต้น

คุณภาพของผัก

คุณภาพของผักเป็นส่วนประกอบของลักษณะและสมบัติที่ทำให้ผักนั้นมีคุณค่าต่อการบริโภค แต่ผู้บริโภคส่วนมากมักให้ความสนใจต่อลักษณะปรากฏภายนอกของผลิตผล ความแข็งหรือนุ่มของเนื้อสัมผัส รสชาติ รวมถึงคุณค่าทางโภชนาการ (दनัยและนิธิยา, 2548) ดังนั้นผู้ผลิตจะต้องคำนึงถึงลักษณะที่ดีของผักและต้องมีลักษณะผิดปกติที่น้อยที่สุด ซึ่งลักษณะต่างๆ ที่นำมาใช้พิจารณาคุณภาพของผักมีดังต่อไปนี้ (Thompson, 1996)

1. **ลักษณะผิดปกติต่างๆ** ลักษณะผิดปกติหลายอย่างมีผลต่อลักษณะปรากฏ เช่น ลักษณะผิดปกติทางสัณฐานวิทยา มีอยู่หลายลักษณะ ได้แก่ การงอกของต้นมันฝรั่ง หอมหัวใหญ่ และกระเทียม หรือการงอกรากของหอมหัวใหญ่ การเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องของหน่อไม้ฝรั่งภายหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งทำให้หน่อไม้ฝรั่งเกิดการโค้งงอ และยอดมีลักษณะแข็ง (Haard *et al.*, 1974) การงอกของเมล็ดตั้งแต่อยู่ในผล เช่น ในกรณีของผลมะเขือเทศ การบานของก้านดอกภายในหัวของกะหล่ำปลีและผักกาดขาว การบานของดอกบรอกโคลี เป็นต้น ส่วนลักษณะผิดปกติทางกายภาพ เช่น การหดตัวหรือการเหี่ยวของผลิตผล การขาดความฉ่ำน้ำของผลไม้มบางชนิด การเกิดแผลต่างๆ ตลอดจนอาการซ้ำของเนื้อเยื่อ ลักษณะผิดปกติบางอย่างเกิดมาจากอุณหภูมิ เช่น ความเสียหายที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (freezing injury) และเกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) (Kang and Lee, 1997) และลักษณะผิดปกติทางสรีรวิทยา เช่น อาการปลายนใบไหม้ของผักกาดหอม (lettuce tip burn) อาการไส้ดำของแอปเปิล และอาการไส้ดำ (black heart) ของมันฝรั่ง เป็นต้น ส่วนลักษณะผิดปกติทางโรคพืช เช่น การเน่าเสียที่เกิดจากเชื้อราและแบคทีเรีย นอกจากนั้นลักษณะผิดปกติยังเกิดจากสัตว์ ลูกเห็บ และสารเคมี

2. **ลักษณะเนื้อสัมผัส** ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตผลมีความสำคัญต่อคุณสมบัติในการนำไปปรุงอาหาร และเป็นตัวบ่งชี้ความทนทานต่อการขนส่ง

3. การประเมินรสชาติ รสชาตินั้นขึ้นอยู่กับรสและกลิ่นของผลิตภัณฑ์นั้นๆ การประเมินรสชาติควรกระทำทั้งวิธีวัดหาส่วนประกอบทางเคมีต่างๆ ควบคู่ไปกับการใช้มนุษย์เป็นผู้ชิมเพื่อทดสอบรสชาติที่ผิดปกติ (Shi *et al.*, 2005) โดยวิธีการนี้จะทำให้สามารถประเมินรสชาติระดับต่ำสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งการใช้มนุษย์ชิมทำให้สามารถทราบว่าสังคมนั้นชอบผลิตภัณฑ์ที่มีรสชาติอย่างไร และการประเมินรสชาติจะต้องใช้ตัวอย่างและผู้ชิมเป็นจำนวนมาก (Thompson, 1996)

4. คุณค่าทางโภชนาการ ผักเป็นแหล่งสำคัญของสารอาหารที่มนุษย์ได้รับ ทั้งวิตามินซี วิตามินเอ วิตามินบี 6 โทอามีน และไนอาซิน นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของเกลือแร่และเส้นใย สำหรับวิตามินซีจะมีการสูญเสียภายหลังการเก็บเกี่ยว เพราะวิตามินซีสูญเสียง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง สัมผัสกับอากาศ หรือเก็บรักษาไว้นานเกินไป ตลอดจนการเก็บรักษาไว้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่างๆ

การจัดการผักหลังการเก็บเกี่ยว

ความล่าช้าที่เกิดขึ้นตั้งแต่ขั้นตอนระหว่างการเก็บเกี่ยวจนถึงขั้นตอนการลดอุณหภูมิหรือการแปรรูป ทำให้ผักที่เก็บเกี่ยวมาเกิดความเสียหายจากการสูญเสียน้ำและการเน่าเสีย และยังทำให้รสชาติและคุณค่าทางโภชนาการลดลงด้วย การสูญเสียน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น การตั้งวางผักไว้กลางแจ้งเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินซี (दनัยและนิธิยา, 2548) Kader and Morris (1978) พบว่า หากเก็บมะเขือเทศไว้ที่อุณหภูมิ 30 หรือ 40 องศาเซลเซียส นานกว่า 24 ชั่วโมง ภายหลังการเก็บเกี่ยว จะทำให้มะเขือเทศสูญเสียวิตามินซีเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยทั่วไปผักสูญเสียวิตามินซีได้ง่ายกว่าผลไม้ที่มีกรดมาก (दनัยและนิธิยา, 2548; Nagy, 1980) นอกจากนี้ความร้อนที่ปลดปล่อยมาจากกระบวนการหายใจของผัก หรือเรียกว่า vital heat ยังเป็นตัวการทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นด้วย ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผัก พันธุ์ ระยะความแก่ ระยะการสุก การมีบาดแผล อาการช้ำ การเข้าทำลายจากเชื้อราหรือแบคทีเรีย อุณหภูมิที่เก็บรักษา และความเครียดต่างๆ ความร้อนจาก vital heat นี้จัดเป็นข้อมูลสำคัญในการพิจารณาถึงการจัดการด้านอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (दनัยและนิธิยา, 2548; Wilson and Wisniewski, 1994; Moretti *et al.*, 1998)

ภายหลังการเก็บเกี่ยวผักจะมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิของอากาศหรือสภาพแวดล้อมขณะที่ทำการเก็บเกี่ยว ดังนั้นการเก็บเกี่ยวผลผลิตตอนเช้าตรู่อากาศจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าการเก็บเกี่ยวในตอนกลางวันซึ่งอากาศมีอุณหภูมิสูง ความร้อนที่ติดมากับผลผลิตจากแปลงปลูก เรียกว่า field heat เมื่อขนย้ายผักมายังโรงคัดบรรจุและกองรวมกันไว้ ถ้าอากาศผ่านเข้า-ออกหรือถ่ายเทไม่สะดวกจะทำให้ความร้อนที่คายออกมาจากผัก (vital heat) รวมกับความร้อนจากแปลงปลูก

(field heat) สะสมอยู่ภายในกองผลิตผล ทำให้อุณหภูมิของผักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะไปเร่งกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ภายในเซลล์ของผักและเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของเซลล์ ทำให้คุณภาพของผักลดลงและมีอายุการเก็บรักษาลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของผักให้ต่ำลง เพื่อลดความร้อนจากแปลงปลูกที่ติดมากับผักออกไปให้เร็วที่สุดและมากที่สุด เมื่อผักและผลไม่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เกิดขึ้นช้าลง และทำให้กระบวนการชราภาพของเซลล์เกิดช้าลงตามไปด้วย (คณัยและนิธิยา, 2548; จริงแท้, 2550) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อัตราการหายใจของผักลดลง ช่วยชะลอการนำอาหารสะสมไปใช้ ลดการสูญเสียน้ำที่เป็นผลของกระบวนการหายใจ และยับยั้งหรือลดการเจริญของจุลินทรีย์ ทำให้ผักเน่าเสียช้าลง (Kader, 1988; Kang and Lee, 1997) เป็นการลดการสูญเสียน้ำและยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น การจัดการอุณหภูมิจึงเป็นเรื่องสำคัญที่สุดสำหรับการยืดอายุการวางจำหน่ายและรักษาคุณภาพของผัก ดังนั้นจึงควรมีวิธีการที่เหมาะสมสำหรับลดอุณหภูมิผักทุกชนิดให้ต่ำลง โดยเฉพาะผักที่มีอัตราการหายใจสูง เช่น บรอกโคลี ผักโขม ข้าวโพดหวาน เห็ดต่างๆ กระเทียม หน่อไม้ฝรั่ง และถั่วลันเตา เป็นต้น ซึ่งผลิตผลเหล่านี้มีอัตราการเสื่อมสลายเร็วกว่าผลิตผลชนิดอื่น (คณัยและนิธิยา, 2548)

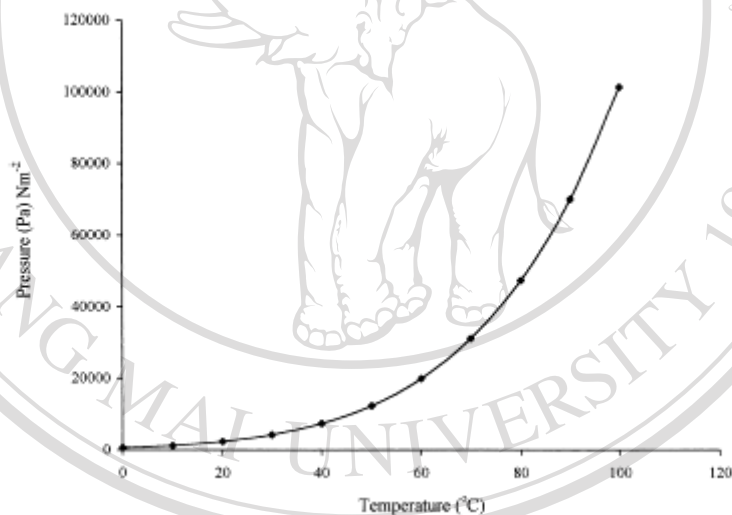
การลดอุณหภูมิเบื้องต้น (pre-cooling)

การลดอุณหภูมิเบื้องต้น หมายถึง การนำความร้อนที่ติดมากับผลิตผลจากแปลงปลูกออกไปจากผลิตผลให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อชะลออัตราการเสื่อมคุณภาพของผลิตผล (Kasmier and Thompson, 1992) นอกจากนี้ยังหมายถึง การนำความร้อนที่มาจากแปลงปลูกออกไปจากผลิตผลสดเพื่อชะลอกระบวนการเมแทบอลิซึมและลดการเสื่อมสภาพก่อนการขนส่งหรือเก็บรักษา (Janick, 1986; Wright *et al.*, 2010) การลดความร้อนที่มาจากแปลงผักทันทีหลังจากการเก็บเกี่ยว (Rudnucki *et al.*, 1991) หรือเป็นการรักษาสภาพความพอใจของผู้บริโภค ความสด และเป็นที่ต้องการของตลาด (Baird and Gaffney, 1976) ดังนั้นการลดอุณหภูมิเบื้องต้นอย่างรวดเร็วจึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเก็บรักษาผัก (Kasmier and Thompson, 1992) การลดอุณหภูมิเบื้องต้นได้ถูกนำมาใช้โดย Powell และคณะในหน่วยงานของกรมวิชาการเกษตรของสหรัฐอเมริกา (USDA) ในปี 1904 (อ้างโดย Ryall and Pentzer, 1982) กระบวนการลดอุณหภูมิเบื้องต้นมีหลายวิธี การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของผลิตผลที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันไป และอัตราส่วนของต้นทุนต่อกำไรจัดเป็นเงื่อนไขสำคัญที่นำมาเป็นเกณฑ์สำหรับการพิจารณาวิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (Mitchell, 1992)

การลดอุณหภูมิด้วยการลดความดัน (Vacuum cooling)

การลดอุณหภูมิด้วยการลดความดัน หมายถึง การลดอุณหภูมิของผลิตผลลงโดยการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในผลิตผลภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Mellor, 1980) โดยผลิตผลจะถูกบรรจุภายในตู้สุญญากาศ (vacuum chamber) ที่เชื่อมต่อกับระบบทำงานลดความดัน ดังภาพ 8

เทคนิคการลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้สามารถปรับใช้กับผลิตผลพืชสวนได้หลายชนิด (Anonymous, 1981; Thompson, 1996) โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตผลที่มีความชื้นและมีความพรุนของผิวสัมผัส และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Wang and Sun, 2001) การลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการระเหยของน้ำภายในผลิตผล โดยอาศัยการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำกว่าระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Tambunan *et al.*, 1994) การเปลี่ยนแปลงจุดเดือดของน้ำตามความดันอ้อมตัวของสภาพแวดล้อม ดังแสดงในภาพ 7



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ของความดันอ้อมตัวและอุณหภูมิที่เป็นจุดเดือดของน้ำ

ที่มา : McDonald and Sun (2000)

หลักการพื้นฐานของการลดอุณหภูมิด้วยการลดความดัน

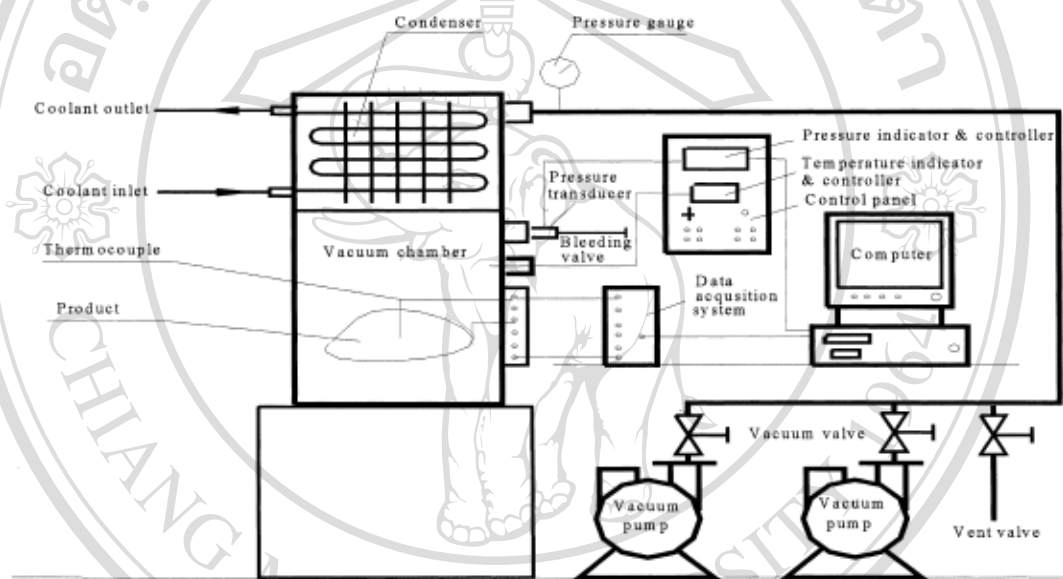
Hass and Gur (1987) และ Everington (1993) ได้อธิบายหลักการพื้นฐานของการใช้ระบบสุญญากาศในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ลดความดันบรรยากาศ ที่ความดันบรรยากาศหรือ atmospheric pressure (1013 mbar; 1atm) จุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงจุดเดือดของน้ำทำได้โดยการเปลี่ยน

ความดันไออิ่มตัวของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ (saturated pressure) โดยความดันที่ทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาเรียกว่า bleed pressure ดังนั้นที่ความดัน 23.37 mbar จุดเดือดของน้ำจะอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 6.09 mbar จุดเดือดของน้ำจะอยู่ที่ 0 องศาเซลเซียส

2. น้ำระเหยเป็นไอ การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารจากของเหลวไปเป็นไอน้ำ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat) จะถูกพาออกมาจากสสารนั้นด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงตามลำดับ

3. กำจัดไอน้ำ โดยไอน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์จะถูกนำออกไปจากระบบ



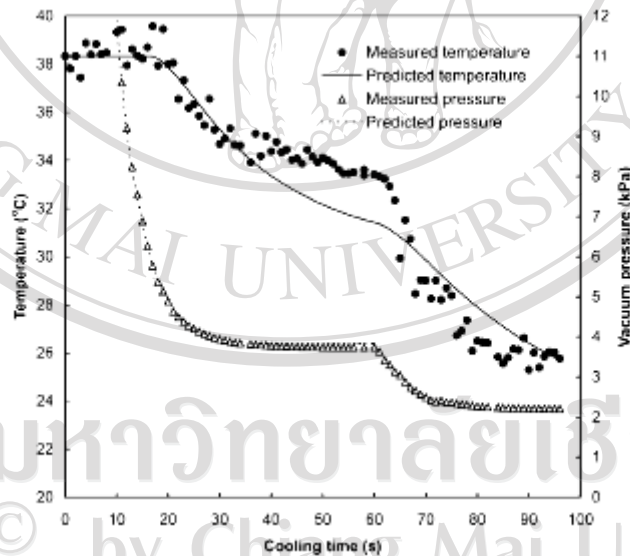
ภาพ 8 แผนภาพแสดงระบบการลดอุณหภูมิด้วยการลดความดัน

ที่มา : Anonymous (1994)

อุปกรณ์ลดอุณหภูมิด้วยการลดความดันและหลักการทำงาน

อุปกรณ์หลักของการลดอุณหภูมิด้วยการลดความดันประกอบด้วย ตู้สุญญากาศ และระบบปั๊มสุญญากาศดังภาพ 8 (Longmore, 1974; Wang and Sun, 2001) กระบวนการทำงานประกอบด้วย 2 ช่วงหลัก ซึ่งการลดอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้ง 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการดูดอากาศออกไปจากระบบ (vacuum chamber) ให้มากที่สุด การดูดอากาศออกไปจากระบบใช้เวลาประมาณ 7 ถึง 10 นาที ขึ้นอยู่กับขนาดของตู้สุญญากาศและประสิทธิภาพของเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Sun and Zheng, 2006) เมื่ออากาศถูกดูดออกไปทำให้ความดันไออิ่มตัวลดลงจนถึงความดันที่ทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาได้ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยทั่วไปอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 20 ถึง

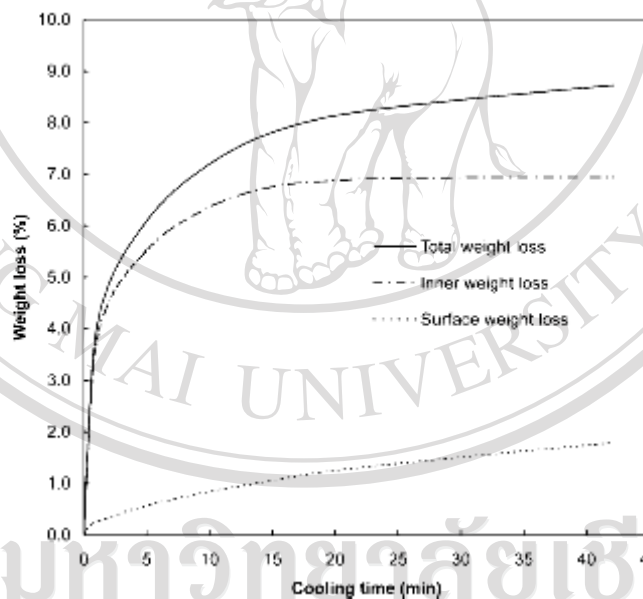
35 องศาเซลเซียส ดังนั้นช่วงแรกของการทำงาน ระบบจะลดความดันภายในตู้จนถึงประมาณ 23.37 mbar ทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยกลายเป็นไอและพาความร้อนแฝงออกมาจากผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดลงเล็กน้อยในช่วงนี้ ช่วงหลังของการทำงาน ระบบจะลดความดันภายในตู้ต่อไปจนถึงความดันสุดท้ายที่กำหนดไว้ (bleed pressure) ซึ่งเป็นช่วงสำคัญของการลดอุณหภูมิด้วยการลดความดัน เพราะระบบจะรักษาความดันไว้เป็นช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้น้ำพาความร้อนออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยช่วงเวลาที่ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์อยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดสำหรับการลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า soak time ไอหรือน้ำที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องจะถูกเครื่องปั๊มสุญญากาศหรืออุปกรณ์ควบแน่นที่ถูกติดตั้งไว้ในพาออกมาจากระบบ เมื่ออุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลดลงจนถึงอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้เก็บรักษาแล้ว กระบวนการทำงานระบบสุญญากาศจะหยุดลงโดยลิ้นควบคุมการระบายอากาศจะถูกเปิดออกทำให้อากาศจากภายนอกเข้ามาในตู้สุญญากาศอีกครั้ง เมื่อความดันภายในตู้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศแล้วประตูจึงเปิดออกแล้วจึงนำผลิตภัณฑ์มาเก็บรักษาต่อไป (Malpas, 1972; McDonald and Sun, 2001; Sun and Zheng, 2006) โดยรูปแบบการลดลงของความดันและอุณหภูมิของน้ำในตู้สุญญากาศได้แสดงดังภาพ 9



ภาพ 9 รูปแบบการลดลงของความดันและอุณหภูมิของน้ำสำหรับ vacuum cooling system

ที่มา : Wang and Sun (2002)

การลดอุณหภูมิด้วยการลดความดันมีอัตราการลดอุณหภูมิลงได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับการลดอุณหภูมิด้วยวิธีอื่น ซึ่งการลดอุณหภูมิผักใบโดยใช้วิธีลดความดันพบว่าสามารถลดอุณหภูมิลงได้ถึง 0.5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ซึ่งเร็วกว่าการลดอุณหภูมิโดยใช้ห้องเย็นถึง 60 เท่า (Longmore, 1973) นอกจากนี้ยังมีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการลดอุณหภูมิด้วยอากาศเย็นและน้ำเย็น (Chen, 1986) แต่การลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้มีข้อเสียคือ การลดความดันไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของผลิตผลลดลงจนถึงจุดเยือกแข็งได้ เช่น ในกรณีอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง (Longmore, 1971) และการสูญเสียน้ำหนักของผลิตผลระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิจัดเป็นปัญหาหลักเช่นกัน โดยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักอาจสูงได้ตั้งแต่ 3 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแปรผันตามระยะเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิและชนิดของผลิตผล (ภาพ 10) อย่างไรก็ตามการพ่นฝอยน้ำระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิจึงสามารถลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักได้ (Wang and Sun, 2002; Zhang and Sun, 2005)



ภาพ 10 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของผลิตผลระหว่างการลดอุณหภูมิด้วยวิธีลดความดัน

ที่มา : Wang and Sun (2002)

การลดอุณหภูมิด้วยการลดความดันร่วมกับการพ่นฝอยน้ำ เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับผักใบต่างๆ เนื่องจากผักใบมีความพรุนของผิวสัมผัสและมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีอายุการเก็บรักษาสั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาการลดอุณหภูมิตันตามไปด้วย

ตัวอย่างผักที่เหมาะสมกับวิธีการลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้คือ ผักกาดหอมห่อ บรอกโคลี ผัก
โคม เซเลอรี และเอนไคว์ รวมไปถึงผักหั่นชิ้นพร้อมปรุงอาหาร เช่น เซเลอรี และแครอทหั่นชิ้น
เป็นต้น (Brosnan and Sun, 2000; Wang and Sun, 2001; Zhang and Sun, 2005) มีรายงานการวิจัยที่
พบว่า วิธีการนี้สามารถลดอุณหภูมิผักกาดหอมห่อลงเหลือ 1 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเริ่มต้น 25
องศาเซลเซียส ภายในเวลาเพียง 30 นาที เท่านั้น และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1
องศาเซลเซียส ได้นานถึง 14 วัน (Everington, 1993; Artes and Martinez, 1995)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved