บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ลำไยมีชื่อเรียกพื้นบ้านว่า บ่าลำไย ชื่อสามัญว่า Longan หรือ Longun หรือ Longyen หรือ Lumkeny ชาวจีนมักเรียกว่า "เล้งมัต" แปลเป็นไทยว่า "ตามังกร" จัดเป็นพืชในตระกูล Sapindaceae สกุล Euphoria และชนิด Longana มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Euphoria longana* Lamk. หรือ สามารถเรียกชื่อทางวิทยาศาสตร์อื่นได้คือ *Dimocarpus longan* Lour. หรือ *E. longan* Sternd หรือ *Nephelium longana* Combess. ลำไยเป็นพืชไม้ผลเขตร้อนและกึ่งร้อน

ประวัติลำไย

ลำไยมีการบริโภคกันมากและเป็นสินค้าที่มีการส่งออกในปริมาณที่สูงด้วย ซึ่งในปี พ.ศ. 2548 (เดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน) ประเทศไทยส่งออกลำไยมูลค่า 1,819.6 ล้านบาท ไปยังประเทศ จีน อินโดนีเซีย ฮ่องกง แคนาดา และสิงคโปร์ (ตาราง 1) โดยมีการส่งออกหลายรูปแบบด้วยกัน โดยในปี พ.ศ. 2546 ปริมาณการส่งออกลำไยสดแช่แข็ง 82,731 ตัน คิดเป็นมูลค่า 1,718.29 ล้านบาท ปริมาณลำไยแห้ง 59,157 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,511.63 ล้านบาท ส่วนปริมาณลำไยบรรจุภาชนะอัดลม 13,542 ตัน คิดเป็นมูลค่า 495.70 ล้านบาท พื้นที่ที่มีการเพาะปลูกลำไยมากคือภาคเหนือของประเทศไทย พบว่ามีเนื้อที่การเพาะปลูก ปริมาณผลผลิต ราคาผลผลิตที่เกษตรกรขายได้รวมทั้งหมดตั้งแต่ปี 2536 - 2545 (ตาราง 2) โดยพันธุ์อีดอหรือดอเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549)

ภาวะเศรษฐกิจการเกษตรของลำไย ปี 2548 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548)

ภาวะการผลิต

ปริมาณผลผลิตลำไย มีประมาณ 0.702 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมา 10.7% จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ให้ผล รวมทั้งสภาพภูมิอากาศเอื้ออำนวยต่อการออกดอกและติดผล และเกษตรกรมีการใช้สารโปแตสเซียมคลอเรต เร่งให้ลำไยออกดอก ประกอบกับในปีที่ผ่านมาลำไยติดผลน้อย จึงทำให้ผลผลิตปีนี้เพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การค้าและระดับราคา

การส่งออก ตั้งแต่เดือนมกราคม - กันยายน ประเทศไทยส่งออกลำไยสดและผลิตภัณฑ์ ปริมาณ 0.183 ล้านตัน มูลค่า 3,724 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีที่ผ่านมา 17.3% และ 13.9% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิต ประกอบกับรัฐได้ดำเนินการผลักดันการส่งออกทั้งลำไยสด และลำไยอบแห้ง โดยคาดว่าทั้งปีจะสามารถส่งออกได้ปริมาณ 0.228 ล้านตัน มูลค่า 4,798 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมา 14.6% และ 16.0% ตามลำดับ

ประโยชน์ของลำไย

เปลือกของต้นมีสีน้ำตาลอ่อนหรือเทา และมีรสฝาดใช้ต้ม เป็นยาหม้อแก้ท้องร่วง ลำต้นมีขนาดใหญ่ สูงประมาณ 30 - 40 ฟุต เนื้อไม้มีสีแดงและแข็งสามารถใช้ทำเครื่องใช้ประดับบ้านได้ ผลลำไยมีเปลือกสีน้ำตาลอมเขียว ภายในมีเนื้อขาวอมชมพูหรือขาวอมเหลืองแล้วแต่สายพันธุ์ เนื้อลำไยสามารถบริโภคสด บรรจุกระป๋อง ตากแห้งสามารถทำเป็นชาชงใช้ดื่ม นอกจากนี้แล้ว ลำไยมีสรรพคุณใหญ่ๆ อยู่สองประการด้วยกัน สรรพคุณประเภทแรก ได้แก่ การบำรุงหัวใจ (ในความเห็นของแพทย์จีนนั้น หัวใจมีความสำคัญครอบคลุมไปถึงสมอง อารมณ์และจิตใจด้วย) และบำรุงม้าม (ระบบย่อยอาหารและการดูดซึมทั้งหมด) เหมาะสำหรับผู้ที่ร่างกายอ่อนแอหรือทรุดโทรม อาทิเช่น สตรีหลังคลอดบุตร สตรีที่มีประจำเดือนมาก คนไข้ที่พึ่งฟื้นจากอาการป่วยหนัก รวมทั้งคนที่มีปัญหาเรื่องอาหารไม่ย่อย และการเบื่ออาหารด้วย สรรพคุณที่สองของลำไย ได้แก่ ประโยชน์ทางด้านการบำรุงเลือด (chemotherapy) เพื่อรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งได้ นอกจากนั้นแล้ว ยาน้ำที่รับประทานแล้วช่วยให้นอนหลับง่ายคลายความเครียดและความกังวล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 1 มูลค่าการส่งออกลำไยของไทย

รายการ	มูลค่า : ล้านบาท				
	2545	**2546**	**2547**	**2547** (ม.ค. - ก.ย.)	**2548** (ม.ค. - ก.ย.)
1. จีน	99.3	226.0	804.0	621.2	840.9
2. อินโดนีเซีย	506.1	539.6	707.9	626.6	514.5
3. ฮ่องกง	947.7	535.4	323.4	235.7	274.1
4. แคนาดา	87.1	73.3	70.3	65.1	55.3
5. สิงคโปร์	56.2	45.5	42.5	37.6	34.1
6. สหราชอาณาจักร	11.1	23.2	16.3	11.7	19.7
7. ฟิลิปปินส์	13.0	13.6	20.8	20.5	18.1
8. มาเลเซีย	65.1	60.2	42.0	39.4	17.1
9. เนเธอร์แลนด์	10.0	20.3	108.7	102.8	12.2
10. ฝรั่งเศส	6.6	6.2	8.1	6.6	10.2
รวม 10 รายการ	1,802.1	1,543.3	2,143.8	1,767.0	1,796.6
อื่นๆ	138.6	111.9	22.3	16.4	23.1
มูลค่ารวม	**1,940.7**	**1,655.2**	**2,166.0**	**1,783.5**	**1,819.6**

ที่มา : สถิติการค้า กระทรวงพานิชย์ (2548)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2 ลำไย : เนื้อที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ราคาและมูลค่าของผลผลิตตามราคาที่เกษตรกรขายได้ พ.ศ. 2536 - 2545

พ.ศ.	เนื้อที่เพาะปลูก (พันไร่)	เนื้อที่ให้ผล (พันไร่)	ผลผลิต (พันตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)	ราคาที่เกษตรกรขายได้ (บาท/กิโลกรัม)	มูลค่าของผลผลิตตามราคาที่เกษตรกรขายได้ (ล้านบาท)
2536	233	172	93	541	11.49	1,069
2537	255	192	193	1,005	7.72	1,490
2538	274	217	144	664	18.87	2,717
2539	295	240	236	983	16.17	3,816
2540	335	259	286	1,104	23.90	6,835
2541	408	275	34	124	60.00	2,040
2542	464	295	143	483	28.78	4,116
2543	514	331	358	1,083	26.17	9,369
2544	591	358	187	522	27.87	5,212
2545	631	396	420	1,060	12.06	5,065

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของลำไย

ลำไยเป็นพืชยืนต้น ทรงพุ่มขนาดปานกลางถึงใหญ่ ทรงพุ่มแผ่กิ่งก้านสาขาและอยู่สูงกว่าพื้นดิน ต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดจะมีลำต้นตรงเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 12 - 15 เมตร และถ้าหากเป็นต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยการตอนกิ่งจะแตกกิ่งก้านสาขาใกล้ๆ กับพื้น และถ้าไม่ได้รับการตัดแต่งในขณะที่ต้นยังเล็ก มักแตกลำต้นเทียมหลายต้น ลำต้นของลำไยไม่ค่อยเหยียดตรงมักเอนหรือโค้งงอ เปลือกลำต้นขรุขระมีสีเทาปนน้ำตาลแตกเป็นสะเก็ด ทำให้กิ่งหักได้ง่ายเมื่อปะทะกับลมอย่างรุนแรง

ใบ เป็นใบรวมที่ประกอบด้วยใบย่อยอยู่บนก้านใบร่วมกัน (pinnately compound leaves) มีใบที่ปลายเป็นคู่มีใบย่อย 3 - 5 คู่ ความยาวใบ 20 - 30 เซนติเมตร ใบย่อยเรียงตัวสลับหรือเกือบตรงข้าม ความกว้างของใบย่อย 3 - 6 เซนติเมตร ยาว 7 - 5 เซนติเมตร รูปร่างใบเป็นรูปรีหรือรูปหอก ไม่มีขน ส่วนปลายใบและฐานใบ ค่อนข้างป้าน ใบด้านบนมีสีเขียวเข้มกว่า ด้านล่างสากเล็กน้อย ขอบใบเรียบไม่มีหยัก ใบเป็นคลื่นเล็กน้อย และเห็นเส้นแขนง (vein) แตกออกจากเส้นกลางใบชัดเจน และมีจำนวนมาก

ช่อดอก ส่วนมากจะเกิดจากตาที่ปลายยอด (terminal bud) บางครั้งอาจเกิดจากตาข้างของกิ่ง มีการแตกแขนงของช่อย่อยมากมายบนก้านช่อที่ยาวถึง 30 เซนติเมตร ช่อดอกขนาดกลางจะมีดอกย่อยประมาณ 3,000 ดอก ช่อดอกแต่ละช่อประกอบด้วยดอก 3 ชนิด คือ ดอกตัวผู้ ดอกตัวเมีย และดอกสมบูรณ์เพศ ดอกมีกลีบเลี้ยงหนาแข็งจำนวน 5 กลีบมีสีเขียวปนน้ำตาล กลีบดอกสีขาวมีจำนวน 5 กลีบ ดอกมีสีขาวหรือขาวอมเหลืองมีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 - 8 มิลลิเมตร มีกลิ่นหอม

1. ดอกตัวผู้ มีขนาดเล็กที่สุด คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 10.65±0.10 มิลลิเมตร มีเกสรตัวผู้ 6 - 8 อัน เรียงเป็นชั้นเดียวอยู่บนจานรองดอก (disc) ซึ่งมีสีน้ำตาลอ่อนและมีลักษณะอุ้มน้ำ ก้านชูเกสรตัวผู้มีขน เกสรตัวผู้มีความยาวสม่ำเสมอ คือ ยาวประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตร อับเรณูมี 2 หยัก และเมื่อแตกจะแตกตามยาว (longitudinal dehiscence)

2. ดอกตัวเมีย มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 11.11±0.7 มิลลิเมตร มีรังไข่ 1 อัน ที่มี 2 พู (bicarpellate) ตั้งอยู่ตรงกลางจานรองดอกเป็นแบบ superior ovary ด้านนอกของรังไข่มีขนปกคลุมอยู่ แต่ละพูจะมี 1 ช่อง (locule) เท่านั้น ที่จะเจริญเติบโตและพัฒนาเป็นผล ส่วนอีกพูหนึ่งจะค่อยๆ ฝ่อ ในบางกรณีอาจพบไข่ในพูทั้งสองเจริญจนเป็นผลได้ เกสรตัวเมียอยู่ตรงกลางระหว่างพู ก้านชูเกสรตัวเมีย (style) ยาวประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ตรงปลายยอดเกสร (stigma) แยกออกเป็น 2 แฉก เห็นได้ชัดเมื่อดอกบานเต็มที่ เกสรตัวผู้มีประมาณ 8 อัน ก้านเกสรตัวผู้เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แบบ semi-sessile filament สั้นเพียง 1 มิลลิเมตร อับเรณูของเกสรตัวผู้จะไม่มีการแตกและไม่มีงอก แต่จะค่อยๆ แห้งตายไปหลังดอกบาน

3. ดอกสมบูรณ์เพศ จะมีขนาดรองลงมาจากดอกตัวเมีย คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 10.87±0.09 มิลลิเมตร เป็นดอกที่มีทั้งเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน รังไข่พองเป็นกระเปาะค่อนข้างกลม ขนาดเล็กกว่ารังไข่ของดอกเพศเมีย ยอดเกสรตัวเมียจะสั้นกว่าตรงปลายจะแยกเพียงเล็กน้อยเมื่อดอกบาน ก้านชูอับละอองของดอกสมบูรณ์เพศมีความยาวไม่สม่ำเสมอกันคือ มีความยาวอยู่ระหว่าง 1.5 - 3.0 มิลลิเมตร ดอกสมบูรณ์เพศสามารถติดผลได้เช่นเดียวกับดอกตัวเมีย

ผล เป็นผลสดแบบ berry ผลกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร ผิวเปลือกเรียบหรือขรุขระมีตุ่มแบนๆ ปกคลุมที่ผิวเปลือกด้านนอก เปลือกสีน้ำตาลปนเหลืองหรือปนเขียว ผลสุกมีเปลือกสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอมแดง เนื้อลำไยเป็นเนื้อเยื่อพาเรนไคมาที่เจริญล้อมรอบเมล็ด (outer integument) และอยู่ระหว่างเปลือกกับเมล็ด เนื้อหนาหรือบางสีขาวใสหรือขาวขุ่น มีลักษณะคล้ายวุ้นหรือฉ่ำน้ำ มีกลิ่นหอม รสหวาน แตกต่างกันไปตามพันธุ์ แต่ละผลมีเมล็ดจำนวน 1 เมล็ด เมล็ดมีลักษณะกลมจนถึงแบน เมื่อยังไม่แก่มีสีขาวแล้วค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีดำมัน ส่วนของเมล็ดที่ติดกับขั้วผล (placenta) เป็นเนื้อเยื่อสีขาวๆ บนเมล็ด ซึ่งมีลักษณะคล้ายตามังกร (dragon's eye) placenta นี้ จะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ต่างกันไปตามพันธุ์ เมื่อผลแก่จัดถ้ายังไม่เก็บเกี่ยว placenta จะใหญ่ขึ้น เนื่องจาก placenta ดูดอาหารไปเลี้ยงเมล็ด ทำให้เนื้อมีรสชาติจืดลง (สำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย, 2542)

ลำไยสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะตามระยะเวลาในการติดดอกออกผลคือ

ก. พันธุ์เบา ได้แก่ พันธุ์ดอ

ข. พันธุ์ปานกลาง ได้แก่ พันธุ์แห้ว พันธุ์ชมพู

ค. พันธุ์หนัก ได้แก่ พันธุ์อีแดง เบี้ยวเขียว และพันธุ์พวงทอง

นอกจากนี้ลำไยยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการเจริญเติบโต ได้แก่

1. ลำไยป่า (indigenous longan)

เป็นลำไยที่พบในบริเวณป่าทั่วไป ทรงพุ่มขนาดใหญ่ ผลขนาดเล็กมาก เนื้อบางเบา ใช้เป็นวัตถุดิบในการผสมพันธุ์ลำไย

2. ลำไยพื้นเมือง (common or native longan)

บางครั้งเรียกว่า "ลำไยกระดูก" พบเห็นอยู่ทั่วไปในภาคเหนือและเหลือน้อยเต็มทีเพราะไม่นิยมปลูกและไม่มีราคา มีลักษณะเป็นทรงพุ่มตั้งตรงและขนาดใหญ่มาก ลำต้นและกิ่งมีผิวเปลือก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขรุขระมาก ให้ผลดกมาก ผลขนาดเล็ก เนื้อบาง เมล็ดใหญ่ คุณภาพไม่ดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ 13.75% ใช้เป็นต้นตอ

3. ลำไยพันธุ์ดีหรือลำไยกะโหลก (commercial or cultivated longan)

เป็นลำไยที่นิยมปลูกกันมากเพราะมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ผลขนาดใหญ่ เนื้อหนา เมล็ดเล็ก กลุ่มพวกนี้จะเรียกอีกแบบได้ คือ กลุ่มลำไยอีดอหรือถ้าจะเรียกแบบเมืองเหนือก็ต้องเรียกว่า พันธุ์อีดอ ซึ่งไม่ใช่คำหยาบคายอะไร พืชพันธุ์ใดที่เป็นพันธุ์เบาออกก่อนเขา ภาษาเหนือจะเรียกว่า พันธุ์ดอทั้งนั้น

4. ลำไยเครือหรือลำไยเถา (semi-vine longan)

เป็นลำไยที่มีทรงพุ่มมีลักษณะเป็นเถาเลื้อยคล้ายเฟื่องฟ้า ผลขนาดเล็กมาก เมล็ดโต เนื้อผลมีกลิ่นคล้ายกำมะถัน พบทางภาคตะวันออกของประเทศไทย เช่น จังหวัดชลบุรี ใช้ปลูกเป็นไม้ประดับมากกว่ารับประทาน

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลลำไยเมื่อโตเต็มที่เมล็ดจะมีสีดำหรือสีน้ำตาล ผลมีลักษณะกลมคล้ายรูปหัวใจ และเมื่อผลแก่เปลือกผลจะไม่แตก (indehiscent pericarp) สีเปลือกมีทั้งสีเหลืองไปจนถึงสีน้ำตาลอ่อน และมีผิวเรียบ เนื้อผลมีสีขาว (aril) มีกลิ่นคล้ายลิ้นจี่ แต่ลักษณะเนื้อผิวมีความแน่นเนื้อมากกว่า และมีน้ำน้อยกว่า ลำไยเป็นผลไม้ที่มีเมล็ดเดียว และมี testa ที่เรียบ เมื่อโตเต็มที่เปลือกผลลำไยประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น ชั้นนอกสุดของ epicarp มี cuticle ที่ต่อเชื่อมกัน และเป็น uniseriate epidermis มี subepidermis เป็นเนื้อเยื่อ sclerenchyma ชั้น middle mesocarp เป็นเนื้อเยื่อ parenchyma และเนื้อเยื่อชั้น inner endocarp มีลักษณะของเซลล์ที่เล็ก และมีผนังเซลล์บาง (Jiang *et al.*, 2002)

ลักษณะประจำพันธุ์ของลำไยพันธุ์ดอ

ลำไยพันธุ์ดอเป็นลำไยกะโหลก เป็นพันธุ์เบา คือออกดอกและเก็บเกี่ยวผลก่อนพันธุ์อื่น การเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลสม่ำเสมอออกผลทุกปีและให้ผลผลิตดีพอสมควร มีผลขนาดปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 18.5 กรัม/ผล ทรงกลมแป้นเบี้ยวเล็กน้อย ยกบ่าข้างเดียว และบริเวณฐานผล (หัวขั้ว) บุ๋ม เส้นผ่าศูนย์กลางผลส่วนกว้างประมาณ 2.6 เซนติเมตร ส่วนแคบ 2.3 เซนติเมตร ส่วนสูงประมาณ 2.4 เซนติเมตร เปลือกมีสีเขียวปนน้ำตาล ผลลำไยที่เจริญเติบโตเต็มที่ส่วนของ pericarp มี 3 ชั้น ชั้นนอกสุด หรือ epicarp เป็นชั้นที่มี cuticle ปกคลุมชั้นนี้ประกอบด้วยเซลล์ epidermis และ subepidermal sclerenchyma ชั้นกลางหรือ middle mesocarp ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ parenchyma ชั้นในสุดหรือ inner endocarp เป็นชั้นที่บางที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประกอบด้วย epidermal cells ที่ไม่มี suberin ปกคลุม pericarp จะมีสีเขียวจนกระทั่งผลเจริญเติบโตเต็มที่ ซึ่งช่วงนี้ส่วนของ pericarp มีการสังเคราะห์รงควัตถุสีเหลืองขึ้น (Jiang *et al.*, 2002) ผิวผลมีลักษณะเป็นกระหรือตาห่างๆ กระสีน้ำตาลเข้ม เนื้อผลหนา สีขาวขุ่น ค่อนข้างเหนียว ไม่กรอบ มีกลิ่นคาวเล็กน้อย รสหวาน จุกไม่ใหญ่นัก ถ้าปล่อยให้แก่จัดจุกจะขยายใหญ่และแข็ง หรือที่เรียกว่า ขึ้นหัว (กลุ่มเกษตรกรสัญจร, 2542)

ดัชนีการเก็บเกี่ยว

ลำไยเป็นผลไม้ชนิด non-climacteric หลังจากที่ทำการเก็บเกี่ยวมาจากต้นแล้วไม่มีการพัฒนาต่อเนื่องไปจนสุก (Paull and Chen, 1987) ดังนั้นการเก็บเกี่ยวผลจึงทำเมื่อสีเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาล และเนื้อผลมีคุณภาพเหมาะสมต่อการบริโภค ความแก่ของผลลำไยสามารถตรวจ สอบได้จาก

1. ลักษณะทางกายภาพ เช่น น้ำหนักผล ขนาด และการเปลี่ยนสีของเปลือก การนับจำนวนวันหลังดอกบาน

2. ลักษณะทางด้านเคมี เช่น ปริมาณน้ำตาล ปริมาณกรด สัดส่วนน้ำตาลและกรด

การเก็บเกี่ยวผลลำไยในระยะที่ไม่เหมาะสม เช่น อ่อนหรือแก่เกินไปจะมีผลกระทบต่อคุณภาพ เช่น หากเก็บผลอ่อนเกินไป ลำไยจะมีรสหวานน้อย ผลโตไม่เต็มที่ ทำให้ไม่ได้น้ำหนัก ในขณะที่การเก็บเกี่ยวเมื่อแก่เกินไป ผลลำไยขึ้นหัว (หัวจุกโต) ความหวานลดลง และเนื้อจะแห้ง ปกติแล้วผลลำไยที่แก่เต็มที่เปลือกด้านนอกจะเรียบ เปลือกด้านในมีเส้นคล้ายร่างแห เมล็ดสีดำ เมื่อชิมดูมีรสหวาน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในช่วง 16 - 22 °Brix (พาวิน, 2543) ส่วนประกอบของผลลำไยระยะเก็บเกี่ยวมีดังนี้ (ตาราง 3)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3 ส่วนประกอบของผลลำไยที่เก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่ในปี พ.ศ. 2526 และ 2527

ส่วนประกอบของผลลำไย	ค่าเฉลี่ย	
	ปี พ.ศ. 2526	ปี พ.ศ. 2527
เนื้อผล (%น้ำหนักแห้ง)	19.80	16.50
เปลือกผล (%น้ำหนักแห้ง)	35.70	35.60
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%)	20.10	18.30
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)	184.00	54.00
ซูโครส ((มิลลิกรัม/กรัม)	72.00	29.00
กลูโคส (มิลลิกรัม/กรัม)	22.00	17.00
ฟรุคโตส (มิลลิกรัม/กรัม)	28.00	23.00
ปริมาณกรดที่ไทเทรต (มิลลิกรัม/กรัม)	2.30	2.10
pH	6.20	6.40
กรดซิตริก (มิลลิกรัม/กรัม)	0.13	0.12
กรดมาลิค (มิลลิกรัม/กรัม)	0.89	0.35
กรดซัคซินิก (มิลลิกรัม/กรัม)	1.85	1.15
กรดแอสคอร์บิก (มิลลิกรัม/กรัม)	2.00	1.40
ปริมาณของฟีนอลทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)	0.80	0.50

ที่มา : Paull and Chen (1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คุณค่าทางอาหารของลำไย

กองวิทยาศาสตร์ กรมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของลำไย ปรากฏผลว่า

1. ลำไยสดทั่วไป ประกอบด้วยน้ำ 81.1% คาร์โบไฮเดรต 16.98% โปรตีน 0.97% เถ้า 0.56% กาก 0.28% และไขมัน 0.11% ในลำไยสด 100 กรัม จะมีค่าความร้อน 72.8 แคลอรี และมีวิตามิน 69.2 มิลลิกรัม แคลเซียม 57 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 35.17 มิลลิกรัม และธาตุเหล็ก 0.35 มิลลิกรัม

2. ลำไยแห้งประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต 69.06% น้ำ 21.27% เถ้า 3.33% กาก 1.50% และไขมัน 0.171% ในลำไยแห้ง 100 กรัม จะมีค่าความร้อน 296.1 แคลอรี แคลเซียม 32.05 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 150.5 มิลลิกรัม โซเดียม 4.78 มิลลิกรัม เหล็ก 2.85 มิลลิกรัม โพแทสเซียม 1390.3 มิลลิกรัม กรดแพนโทธินิค 0.72 มิลลิกรัม วิตามินบี 12 1.08 มิลลิกรัม

การกำหนดเกรดลำไย

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้กำหนดมาตรฐานลำไย โดยใช้เกณฑ์ของจำนวนผลต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (ตาราง 4)

ตาราง 4 มาตรฐานลำไยของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ขนาด	จำนวนผลต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม	
	ลำไยช่อ	ลำไยผลเดี่ยว
1	<85	<91
2	85 - 94	91 - 100
3	95 - 104	101 - 111
4	105 - 114	112 - 122
5	>115	>123

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2545)

สาเหตุที่ก่อให้เกิดการเน่าของผลลำไย

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีเปลือกบาง มีปริมาณน้ำตาลสูงมีอายุการเก็บรักษาสั้น เป็นผลไม้ที่เน่าเสียได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งอาจจะถูกจุลินทรีย์เข้าทำลายตั้งแต่ก่อนการเก็บเกี่ยวจนถึงระยะหลังการเก็บเกี่ยว จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตลำไยหลังเก็บเกี่ยว โดย ชิง ชิง (2520) ได้สรุปถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของผลลำไยซึ่งมี 4 สาเหตุที่สำคัญ คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1. เชื้อจุลินทรีย์

เนื่องจากเนื้อผลลำไยมีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลสูง เชื้อจุลินทรีย์จึงสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ผลจากการแยกเชื้อจุลินทรีย์จากผลลำไยที่เน่าพบว่าจุลินทรีย์ส่วนใหญ่คือ ยีสต์และแบคทีเรีย แต่เมื่อเก็บรักษาผลลำไยที่เน่าไว้ระยะเวลา 10 วัน แล้วทำการแยกเชื้อพบว่าเชื้อที่พบส่วนใหญ่เป็นเชื้อรา ได้แก่ *Lasiodiplodia* sp., *Pestalotiopsis* sp., พบรองลงมาได้แก่ *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp. นอกจากนี้ยังพบ *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp., *Cephalosporium* sp., *Collectotrichum* sp., *Curvularia* sp., *Fusarium* sp., *Mucor* sp., *Nigrospora* sp., *Penicillium* sp., *Pestalotiopsis* sp., *Paecilomyces* sp., *Phomopsis* sp., *Rhizopus* sp., *Rhizoctonia* sp. และ Yeasts (จริยา , 2542)

2. อายุระหว่างการเก็บรักษา

อายุของผลลำไยระหว่างการเก็บรักษามักจะสั้นกว่าผลไม้ชนิดอื่น จากการศึกษาพบว่าอายุการเก็บรักษาผลลำไยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ กล่าวคือที่อุณหภูมิห้องลำไย 2 ใน 3 ส่วนที่เก็บไว้จะเน่าเสียภายใน 4 วัน และผลลำไยทั้งหมดจะเน่าถ้าเก็บรักษาไว้นานเกิน 1 สัปดาห์ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 18 °C จะยืดเวลาการเน่าเสียได้อีก 2 วัน ลำไยประมาณ 20% จะเน่าเสียเมื่อเก็บรักษาไว้ 1 สัปดาห์ และลำไยทั้งหมดที่เก็บรักษาจะเน่าภายหลังเก็บไว้นานเกินกว่า 2 สัปดาห์

3. บาดแผลและความบอบช้ำในระหว่างเก็บรักษา

บาดแผลและรอยช้ำที่เกิดกับผลลำไยมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การเน่าของผลลำไยสูง จากการทดลองใช้เข็มหมุดแทงทะลุเปลือกถึงเนื้อผล ผลละ 3 แห่ง พบว่าประมาณ 75% ของผลที่มีบาดแผลจะเน่าเสียภายใน 4 วัน เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ผลที่ไม่ได้ทำแผลเสียหายเพียง 30% และความบอบช้ำระหว่างการขนส่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดอาการเน่าเสีย จากการทดลองพบว่าผลลำไยที่ใช้มือกดสร้างความบอบช้ำเน่าเสียหาย 70% เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 11.5 °C เป็นเวลา 11 วัน ในขณะที่ผลที่ไม่บอบช้ำเน่าเสียเพียง 37%

4. การเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกเป็นสีน้ำตาล

ผลลำไยมีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วหลังจากทำการเก็บเกี่ยวได้ไม่กี่วัน การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเปลือกเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำ และ/หรือ ความเครียดเนื่องจากการได้รับความร้อน การเสื่อมสภาพ การเกิดอาการสะท้านหนาวและการทำลายโดยโรคและแมลง Underhill and Critchley (1993) รายงานว่า cuticle ที่ปกคลุมส่วนของ pericarp อยู่มีความหนาน้อยมาก เนื้อเยื่อของเปลือกผลลำไยประกอบด้วยชั้นของ cork ที่ไม่มีการพัฒนา stone cell และ parenchyma cell ที่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ขนาดใหญ่ ในสภาพอุณหภูมิห้อง พบว่ามี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การสลายตัวของโครงสร้างเซลล์เมมแบรนอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เซลล์สูญเสียความสามารถในการผ่านเข้า-ออกของสารภายใน

ลักษณะอาการเน่าเสียของลำไยและการแพร่ระบาด

ลักษณะอาการผลลำไยมีรอยแผล รอยช้ำ รอยแตก ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการเก็บเกี่ยวหรือการขนส่ง ทำให้ผลลำไยเน่า ฉ่ำน้ำ เปลือกลำไยมีสีน้ำตาลคล้ำ มีของเหลวไหลออกมาเปื้อนผล มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว มีเส้นใยของเชื้อราขึ้นปกคลุม ขั้วผลเน่าเป็นสีน้ำตาล เนื้อลำไยมีสีขาวขุ่น (ธิดา, 2535) อาการของผลเน่าแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ (เสน่ห์, 2530) ได้แก่

1. เนื้อผลเน่า ผิวเปลือกเป็นสีดำ มีรอยแตกของเปลือกเป็นเกล็ดสีดำ มีจุดสีขาวฟูๆ บริเวณขั้วผล เนื้อผลเริ่มนิ่ม บางส่วนบุ๋มลงไป มีกลิ่นฉุน

2. เนื้อผลเน่า ผิวเปลือกสีน้ำตาลคล้ำ บางส่วนผิวสีเหลืองคล้ำ บริเวณขั้วมีเส้นใยสีขาวปนน้ำตาลคลุมโยงกัน เนื้อผลนิ่มบางส่วนหลุดหายไป ฉ่ำน้ำมีกลิ่นฉุน

3. เนื้อผลปกติ เปลือกมีสีน้ำตาลคล้ำ มีเส้นใยสีขาวหรือสีน้ำตาลคลุมทั่วผล บริเวณขั้วจะมีเส้นใยของเชื้อราคลุมมากกว่าผิวเปลือก ลำไยแห้ง มีกลิ่นฉุน

4. เนื้อผลและเปลือกปกติ มีเส้นใยปกคลุมบริเวณขั้วและบางส่วนของผลขาวแห้ง มีเกล็ดสีเทาดำขึ้นเป็นช้าๆ บริเวณขั้วมีเส้นใยฟูมาก กลิ่นปกติ

เชื้อจุลินทรีย์สาเหตุก่อโรคของลำไยอาจเริ่มเจริญแฝงอยู่ตั้งแต่ในระยะที่เป็นดอกหรือผลอ่อน โดยที่ยังไม่แสดงอาการของโรค (ลักษณะของ endophytic fungi) หรือเชื้อที่ปนเปื้อนอยู่ตามเปลือกผลอาจเข้าทำลายได้ในระหว่างการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งหากมีการจัดการไม่ถูกวิธีก็จะเกิดรอยแผลที่สร้างความบอบช้ำจากการขนส่ง การบรรจุหีบห่อ หรือมีแมลงเข้าทำลาย ซึ่งเป็นการเปิดโอกาสให้เชื้อราเข้าทำลายได้ง่ายขึ้น ทำให้ผลลำไยเกิดการเน่าหรือมีน้ำหวานไหลออกมาจากรอยแผลที่เปลือกและเชื้อสามารถลุกลามทำความเสียหายให้แก่ผลลำไยปกติอื่นๆ ที่บรรจุในภาชนะเดียวกัน (จริยา , 2542)

การป้องกันการเสียหายของผลลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยว

เมื่อเก็บเกี่ยวผลลำไยแล้ว การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวทุกขั้นตอนควรทำอย่างระมัดระวัง เพื่อช่วยลดการชอกช้ำและการเกิดบาดแผลของลำไยที่จะเกิดขึ้น และจากการรวบรวมเอกสารด้านคุณภาพของผลลำไย พบว่ามีการใช้วิธีการต่างๆ กับผลลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยวได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1. การใช้อุณหภูมิต่ำ

Subhadrabandhu (1990) รายงานว่าทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการจัดการกับลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยว คือ การลดอุณหภูมิ โดยสามารถใช้วิธี hydrocooling หรือวิธี forced air cooling ซึ่งเมื่อทำการลดอุณหภูมิแล้ว พบว่าผลลำไยสามารถเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำได้เป็นเวลานาน โดยไม่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลเกิดขึ้นด้วย อย่างไรก็ดีบางพื้นที่จะใช้วิธีการวางน้ำแข็งไว้บนตะกร้าที่ใส่ผลลำไย เช่นเดียวกับ อรรณพและคณะ (2534) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาต่อคุณภาพของผลลำไย พบว่าผลลำไยพันธุ์เบี้ยวเขียวที่บรรจุอยู่ในถาด แล้วหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก polyvinylchloride (PVC) เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำสามารถลดการเน่าเสียและรักษาคุณภาพของผลลำไยให้เก็บรักษาได้นานขึ้น ซึ่งถ้าเก็บรักษาไว้ไม่เกิน 1 สัปดาห์ ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10 °C แต่หากต้องการเก็บรักษาไว้นานกว่านี้ควรรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C ซึ่งสามารถเก็บรักษาได้นาน 21 วัน ต่อมา ทางสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และสำนักงานปลัดวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2536) กล่าวว่าวิธีหนึ่งของการรักษาคุณภาพของผลลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยว คือ การทำให้ผลลำไยเย็นก่อนการขนส่ง ซึ่งถ้าผลลำไยได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น ความหวานจะลดลงและผลลำไยจะเน่าเสียมากขึ้น ทำให้คุณภาพด้อยลง ในสมัยก่อนมีการใช้น้ำเย็นหรือน้ำแข็งแช่ก่อนขนส่ง แต่ผลลำไยที่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วไม่ควรจะให้ถูกน้ำเนื่องจากจะทำให้มีกำมะถันตกค้างที่เปลือกมากขึ้น ระบบ forced air cooling หรือวิธีผ่านอากาศเย็นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ดีมากในการรักษาคุณภาพผลลำไย แต่ถ้าผลิตผลมีน้อยจะไม่คุ้มกับการลงทุน และสถาบันอาหาร (2541) รายงานว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลลำไยระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม หากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90 - 95% การเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 5 °C จะเก็บได้ 30 - 45 วัน และที่อุณหภูมิ 5 - 10 °C จะเก็บได้ 20 - 30 วัน โดยหลังจากเอาออกมาจากห้องเย็นควรรักษาอุณหภูมิให้ต่ำ 2 - 5 °C อย่างต่อเนื่อง

2. การใช้อุณหภูมิสูง

กนกมณฑล (2526) รายงานว่าการใช้อุณหภูมิสูงกับผลลำไยหลังการเก็บเกี่ยวโดยแช่ผลลำไยในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 48 - 52 °C แล้วนำบรรจุในถุง polypropylene และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C สามารถเก็บรักษาได้นาน 4 สัปดาห์ ผลลำไยจะมีกลิ่นสุกเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อน เช่นเดียวกับ จิรา (2537) รายงานว่าการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่พืชเป็นอันตราย 2 - 3 °C สามารถกำจัดหรือยับยั้งการเข้าทำลายเชื้อโรคได้ ซึ่งการใช้ความร้อนเป็นวิธีที่ดี และจากการทดลองของ ดาวเรือง (2530) โดยการแช่ผลลำไยลงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 52 °C เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เวลา 5 นาที พบว่าที่ความร้อนดังกล่าวสามารถฆ่าเชื้อที่ผิวได้ เช่น เชื้อรา *Cladosporium* sp. แต่การแช่ผลลำไยในน้ำที่อุณหภูมิ 52 °C จะทำให้เปลือกลำไยเกิดสีคล้ำขึ้นภายในระยะเวลา 4 วัน นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิสูงก่อนการเก็บรักษายังสามารถเพิ่มความต้านทานหรือลดการพัฒนาของอาการสะท้านหนาวได้ และยังสามารถควบคุมโรคและแมลงหลังเก็บเกี่ยวได้อีกด้วย (Freguson *et al.*, 1994)

3. การใช้สารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา

อรรณพและคณะ (2528) ได้ทำการศึกษาการเก็บรักษาผลลำไยพันธุ์แห้ว โดยการจุ่มน้ำร้อนและจุ่มในสารละลายเบโนมิลความเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่อุณหภูมิ 52 °C และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 - 95% พบว่าการจุ่มผลลำไยในสารละลายเบโนมิลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 52 °C เป็นเวลา 2 นาที สามารถป้องกันการเน่าเสียได้นาน 30 วัน ดาวเรือง (2530) ได้ทำการแช่ผลลำไยพันธุ์ดอและแห้วในสารละลายเบโนมิลในที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก PVC นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 - 95% พบว่าการแช่ลำไยพันธุ์ดอสารละลายเบโนมิล ความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 52 °C นาน 2 นาที และการแช่ผลลำไยพันธุ์แห้วในสารละลายเบโนมิลความเข้มข้น 1,000 ppm ที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากันมีผลชะลอการเกิดสีน้ำตาลเข้มของเปลือกควบคุมการเน่าเสียของผลลำไยทั้ง 2 พันธุ์ ได้นาน 20 วัน แม้ว่าการแช่ที่ระดับอุณหภูมิของสารละลายเบโนมิลที่สูงขึ้นแล้วเวลาในการแช่ที่นานขึ้นจะสามารถลดการเน่าเสียของผลลำไยได้ดีกว่า แต่จะทำให้เปลือกของผลลำไยมีสีน้ำตาลคล้ำขึ้น ธิดา (2535) ได้ศึกษาโรคของลำไยพันธุ์ดอทั้งก่อนและภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยการจุ่มผลลำไยในสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา พบว่าเบโนมิล และโปรคลอแรซ สามารถลดการเกิดโรคที่เกิดจากเชื้อ *Alternaria, Botryodiplodia* และ *Fusarium* ได้ดี โดยสารละลายเบโนมิลความเข้มข้น 1,000 ppm มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ สารละลายโปรคลอแรซความเข้มข้น 125 ppm และสารละลายเบโนมิลความเข้มข้น 500 ppm นอกจากนี้ วรุณรักษ์ (2539) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารอะเซทัลดีไฮด์ต่อการเน่าเสียของผลลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยการรมผลลำไยด้วยสารอะเซทัลดีไฮด์ที่ปริมาตรหรือที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากนั้นนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 °C พบว่าการรมสารอะเซทัลดีไฮด์ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 9 ชั่วโมง หรือการใช้สารเข้มข้น 100% นาน 8 ชั่วโมง การควบคุมโรคจากเชื้อราของผลลำไยพันธุ์ดอ ในขณะที่การใช้สารเข้มข้น 80% เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือการจุ่มผลในสารละลายเข้มข้น 30% เป็นเวลา 10 นาที มีผลในการควบคุมโรคจากเชื้อราของผลลำไยพันธุ์เบี้ยวเขียวได้ และสารอะเซทัลดีไฮด์ความเข้มข้น 40% นาน 12 ชั่วโมง หรือที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความเข้มข้นสูงกว่า มีผลในการทำลายเส้นใยของเชื้อรา *Lasiodiplodia* sp., *Fusarium* sp., *Pestalotiopsis* sp., *Curvularia* sp. และ *Phomopsis* sp. บนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 25 °C และมีผลยับยั้งสปอร์เชื้อรา *Fusarium* sp., *Pestalotiopsis* sp. และ *Curvularia* sp. บน slide culture ภายหลังการบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้สารอะทัลดีไฮด์ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในทางการค้า เนื่องจากระดับความเข้มข้นที่ให้ผลในการควบคุมเชื้อรา ภายหลังการเก็บเกี่ยวมีผลกระทบต่อคุณภาพของผล คือทำให้สีเปลือกด้านในเข้มขึ้นและเนื้อผลมีสีเหลืองเข้มข้นขึ้น รวมทั้งมีกลิ่นของสารที่ยังตกค้างอยู่ในเนื้อผล

4. การใช้สารซัลไฟต์กับผลลำไยสด

การรมควันลำไยด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ริเริ่มโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ซึ่งการรมควันด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถควบคุมการเน่าเสียของผลลำไยอันเนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการขนส่งหรือการเก็บรักษา ผลลำไยที่ผ่านการรมควันจะมีอายุการเก็บรักษาได้นานเกิน 6 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 0 - 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 - 95% ซึ่งพอเพียงกับระยะเวลาในการขนส่งสู่ตลาดต่างประเทศ (ซิง ชิง, 2541) นอกจากนี้ลำไยที่ผ่านการรมควันด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีสีสันสวยงามขึ้นคือสีเหลืองทอง โดยมีการศึกษาการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากสารโซเดียมเมตาบัลไฟต์ 2 กรัม/กิโลกรัม ของผลลำไย แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C สามารถชะลอการเกิดเปลือกสีน้ำตาลคล้ำและควบคุมการเน่าเสียได้ และการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์รมผลก่อนการเก็บรักษาลำไยพันธุ์ดอในอัตรา 200 - 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สามารถชะลอการเจริญของเชื้อรา และป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของเปลือกได้ (ศิวาพร, 2535) นอกจากนี้ Salunkhe and Kadam (1995) ได้ศึกษาการเก็บรักษาลำไยที่อุณหภูมิ 10 °C โดยใช้ซองบรรจุสาร $Na_2S_2O_5$ แนบไว้ในกล่อง สามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาลและโรคหลังการเก็บเกี่ยวได้นานถึง 4 สัปดาห์ แต่มีผลทำให้เกิดกลิ่นแปลกปลอม เนื่องจากการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดการสะสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระดับสูงและควบคุมยากมากกว่าการใช้วิธีการรม

การใช้สารซัลไฟต์ (พรวิสาข์, 2544)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือสารประกอบซัลไฟต์ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้กรดซัลฟูรัสที่ไม่แตกตัว (H_2SO_3) ไบซัลไฟต์อิออน (HSO_3^-) และซัลไฟต์อิออน (SO_3^{2-}) สมการ 1 และ 2

$SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3$ สมการ 1

$2H_2SO_3 \longrightarrow H^+ + HSO_3^-$ หรือ $2H^+ + SO_3^{2-}$ สมการ 2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในรูปอิสระ คือรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนกรดซัลฟูรัสที่ไม่แตกตัว ไบซัลไฟต์อิออน และซัลไฟต์อิออน เป็นรูปที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เป็นผลมาจากกรดซัลฟูรัสที่ไม่แตกตัวมากกว่าตัวอื่นๆ ซึ่งจะพบสารละลายในรูปนี้มากเมื่อสารละลายมีค่า pH น้อยกว่า 3 และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายมีผลทำให้สัดส่วนของกรดซัลฟูรัสที่ไม่แตกตัว ไบซัลไฟต์อิออน และซัลไฟต์อิออนเปลี่ยนแปลงไปด้วย

บทบาทของซัลไฟต์

1. ป้องกันและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ยิ่งค่า pH ต่ำประสิทธิภาพยิ่งสูง

2. ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) ปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับผักผลไม้สดที่หั่นหรือตัด แล้วเมื่อพื้นผิวสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยน phenolic compounds ซึ่งไม่มีสีเปลี่ยนไปเป็นสาร *o*-quinone ที่มีสีซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ phenolase เอนไซม์นี้มีอยู่ผักผลไม้สด ส่วนเอนไซม์อื่นๆ เช่น tyrosinase, catecholase, phenoloxidase และ ascorbinase ก็ให้เกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน โดยจะถูกออกซิไดส์จนมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อเติมสารซัลไฟต์ลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ทำให้เอนไซม์หมดสภาพไป

3. ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) การเปลี่ยนสีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของหมู่บอนิลและอะมิโนที่เป็นอิสระ ซึ่งนำไปสู่การเกิดเม็ดสีน้ำตาลของเมลานอยดิน การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดนั้น เป็นการจำกัดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ เมื่อเติมสารซัลไฟต์ลงไปเกิดปฏิกิริยากับสารตัวกลางที่มีหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลเอลโดส ทำให้เกิดสารประกอบ ดังสมการ 3 จึงสามารถป้องกันไม่ให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเป็นสีน้ำตาล

$$NaHSO_3 + RCHO \longrightarrow RCHOSO_3Na \qquad \text{สมการ 3}$$

4. ป้องกันการสูญเสียแอสคอร์บิกในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ และป้องกันการเหม็นหืนของไขมัน น้ำมันหอมระเหยและแคโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้เกิดกลิ่น รสที่ผิดปกติ โดยคุณสมบัติเป็นสารแอนตีออกซิแดนซ์ และ reducing agent

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายงานการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซัลไฟต์เพื่อควบคุมโรค

Harvey (1956) รายงานว่าการรมผลองุ่นด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อควบคุมโรคเน่าที่เกิดจากเชื้อรา โดยทำการรมครั้งแรกด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้น 1% นาน 20 นาที และหลังจากนั้นทำการรมทุกๆ สัปดาห์ โดยใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.25% นาน 20 - 30 นาที สามารถลดการเน่าเสียของผลองุ่นได้ สอดคล้องกับ Coates *et al.* (1992) พบว่าการรมผลลิ้นจี่ด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 1.2% นาน 20 นาที แล้วแช่ในกรด HCl ความเข้มข้น 1 N นาน 30 วินาที สามารถควบคุมโรคซึ่งเป็นผลมาจาก *Collectotrichum* spp. และ *Alternaria* sp. ได้เป็นอย่างดีรวมทั้งการควบคุมโรค blue mold ซึ่งมีสาเหตุมาจาก *Penicillium* sp. ซึ่งก็สามารถควบคุมได้เช่นกัน นอกจากนี้ Coates *et al.* (1992) พบว่าการใช้ซองที่ปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาอย่างช้าๆ สามารถควบคุมการเกิดโรคผลลิ้นจี่ได้เป็นอย่างดี แต่มีผลทำให้เกิดการฟอกสีที่ไม่สม่ำเสมอและเมื่อนำซองที่ปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจะทำให้เกิดการคืนสีของเปลือกด้านนอกไม่สมบูรณ์และพบการเจริญของเชื้อ *Penicillium* sp. ด้วย และ Thompson (1996) รายงานว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้เกิดการสึกกร่อนได้ง่าย โดยเฉพาะกับโลหะ เพราะก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้ปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศได้เป็นกรดซัลฟูรัสขึ้นมา หากประยุกต์ใช้ซองบรรจุสาร $Na_2S_2O_5$ ใส่ไว้ในกล่องผลไม้ จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาอย่างช้าๆ และพบว่าสามารถควบคุมเชื้อ *Botryis cinerea* ในผลองุ่นได้เป็นอย่างดี

ปัจจุบันมีประเทศผู้นำเข้าลำไยบางประเทศห้ามไม่ให้ใช้สารซัลเฟอร์ไดออกไซด์และมีแนวโน้มว่าประเทศอื่นๆ จะห้ามไม่ให้ใช้สารซัลไฟต์นี้ด้วย นอกจากนี้คนไทยส่วนใหญ่เริ่มตื่นตัวในการบริโภคอาหารที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ ดังนั้นจากคุณสมบัติของโอโซนดังกล่าวจึงควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อหากรรมวิธีอื่นเช่นการใช้โอโซนในการควบคุมโรคเน่าของผลลำไยหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมโรคให้ใกล้เคียงหรือดีกว่าการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อทดแทนหรือลดปริมาณสารตกค้างซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในผลลำไย และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไยให้นานขึ้น

การประยุกต์ใช้โอโซนเพื่อควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมอาหาร

หลักการทั่วไปของโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว เป็นก๊าซไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 จุดหลอมเหลวที่ -192.1 °C จุดเดือดที่ 112 °C และความหนาแน่นของไอเท่ากับ 1.65 (air = 1) (ชมพูศักดิ์และเทพนม, 2540) โดยอยู่ในรูปของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของเหลวสีน้ำเงินเข้ม ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น N-pentane, carbon tetrachloride และ dioxane ละลายน้ำได้เล็กน้อย 0.57 ppm ที่ 20 °C มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงมาก สามารถเกิดการระเบิดได้เมื่อได้รับความร้อนสูง การใช้งานจึงต้องเจือจางด้วยอากาศหรือออกซิเจน แต่โอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซออกซิเจน

การสลายตัวและระดับที่ยอมให้สัมผัสได้

ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซไม่คงที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นออกซิเจนได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จะสลายตัวให้ก๊าซออกซิเจน (O_2) และออกซิเจนอะตอม (O) ภายใน 15 - 20 นาที จะมีโอโซนเหลือเพียงครึ่งเดียว และส่วนที่เหลือก็สลายไปเรื่อยๆ จนหมดในที่สุด (ชุดาและคณะ, 2541)

โอโซนเป็นสารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในชั้นโทรโพสเฟียร์มีการสร้างโอโซนโดยผลจากปฏิกิริยา photochemical ระหว่างไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ท่อไอเสียรถยนต์ การระเบิดของภูเขาไฟ และป่าไม้ ส่วนที่อยู่ในชั้นสตราโตเฟียร์สูงจากพื้นโลก 20 กิโลเมตร โดยเกิดจากปฏิกิริยาของแสงอัลตราไวโอเลตกับออกซิเจน ซึ่งชั้นโอโซนทำหน้าที่กรองแสงยูวี ในช่วงคลื่น 290 - 320 นาโนเมตร จากแสงอาทิตย์ให้ผ่านมายังผิวโลกน้อยลง ในธรรมชาติบนพื้นโลกก็พบโอโซน เช่น บริเวณชายทะเลและบนยอดภูเขาซึ่งมีปริมาณเพียง 0.01 - 0.05 ppm โดยเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับแสงยูวี หรือสายฟ้าแลบ เนื่องจากโอโซนมีเสถียรภาพต่ำ จึงสลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยนี้สามารถทำให้มลพิษที่มีอยู่ในอากาศบริเวณโดยรอบถูกทำลายอากาศบริเวณชายทะเล และบนภูเขาจึงมีความบริสุทธิ์ และสดชื่นมากกว่าอากาศในเมืองใหญ่ซึ่งมีมลพิษสูง (จิรวัฒน์และคณะ, 2545)

โอโซน (O_3) เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ ซึ่งโดดเด่นกว่าสารเคมีที่ทำหน้าที่แบบเดียวกันคือ การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะไวรัส ซึ่งคลอรีนไม่สามารถทำลายได้ โอโซนเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และปลอดเชื้อจุลินทรีย์สมบูรณ์แบบ สารเป้าหมายในการทำปฏิกิริยาของโอโซนในโครงสร้างเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น (พรพิมล, 2543) โอโซนเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีอย่างดี และเป็นสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อย่างรุนแรง โดยมีข้อดีคือ การแตกตัวของโอโซนไม่ก่อให้เกิดสารพิษคือ การแตกตัวของโอโซนทำให้เกิดออกซิเจน โอโซนยังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือฆ่าจุลินทรีย์สาเหตุโรคพืชบางชนิดได้ เพราะเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ซึ่งเป็นโปรตีนห่อหุ้มและหล่อเลี้ยงจุลินทรีย์ต่างๆ ทั้งแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส จะถูกทำลาย (ชมภูศักดิ์, 2540)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ข้อจำกัดของการใช้โอโซน (สิริพร, 2543)

1. การสลายตัวของโอโซน โอโซนจะสลายตัวได้ง่ายกว่าคลอรีน การสลายตัวของโอโซนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เป็นการยากที่จะคาดคะเนว่าโอโซนจะมีปฏิกิริยาอย่างไรในสภาพที่มีอินทรีย์สารโดยอาจจะออกซิไดส์สารนั้นเป็นไอออน หรืออาจสลายตัวไปเป็นออกซิเจนและอนุมูลอิสระ

2. การเสื่อมคุณภาพของอาหาร ถ้ามีการใช้โอโซนมากเกินไป อาจทำให้เกิด lipid oxidation ทำให้อาหารมีกลิ่นรสผิดปกติ และสีจางลงหรือเปลี่ยนไป โอโซนอาจไปลดกรดแอสคอร์บิกในบรอคโคลี่ ลดปริมาณ thiamine ในแป้งข้าวสาลี แต่ในขณะเดียวกันก็มีรายงานว่าโอโซนทำให้กลิ่นรสของอาหารดีขึ้น ดังนั้นการเสื่อมคุณภาพของอาหาร เนื่องจากโอโซนน่าจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของอาหารนั้น ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ตลอดสภาวะที่ทดสอบ

3. ความเป็นพิษ โอโซนที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร อาจทำให้เกิดการระคายเคืองในคอ จมูก และตาของคนเราได้ และถ้าให้ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมากกว่าเป็นระยะเวลานาน ก็อาจทำให้ถึงตายได้

ดังนั้นการใช้โอโซนในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรกควรมีเครื่องมือตรวจจับโอโซน ระบบทำลายโอโซนตลอดจนเครื่องกรองอากาศในโรงงานเพื่อความปลอดภัยของคนงาน นอกจากนั้นการนำระบบ GMP และ HACCP มาใช้ควบคุมสารที่มีความต้องการโอโซนสูง (high ozone demand) ก็จะช่วยลดปริมาณการใช้โอโซนลงได้ ในประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดให้มีโอโซนในสภาพแวดล้อมของโรงงานได้ไม่เกิน 0.1 ppm (V/V) ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง/สัปดาห์ (CFR, 1997)

อิทธิพลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ของโอโซน (มณฑาทิพย์, 2543)

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิของ medium ที่ลดลงมีผลทำให้โอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจะสูงขึ้น ในขณะเดียวกันโอโซนจะสลายตัวได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2. ความเป็นกรดเป็นด่าง โอโซนมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อ pH ลดลง ที่ pH เป็นด่างจะเกิดการสลายตัวของโอโซนได้ง่ายขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรด

3. ความชื้นสัมพัทธ์ ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนจะสูงขึ้นถ้าอาหารนั้นมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ดังนั้นอาหารที่มี available water (Aw) สูงจะ sensitive กับโอโซนมากกว่าอาหารที่มี Aw ต่ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4. ความต้องการของโอโซนใน medium ถ้าใน medium มีอินทรีย์สารสูง ความต้องการจะสูงตามไปด้วย และประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนจะลดลง แต่ในสภาพที่ไม่มีความต้องการของโอโซน (ozone demand - free) โอโซนจะสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น

5. ความสามารถของโอโซนในการเข้าถึงเชื้อจุลินทรีย์ ถ้าเชื้อจุลินทรีย์จับตัวเป็นกลุ่มก้อน ประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อจะลดลง แต่ถ้าเชื้อจุลินทรีย์มีการกระจายตัวออกมาเช่นการทำ ultrasonic treatment โอโซนจะฆ่าเชื้อเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโอโซน

โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง กลไกที่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้คือ ทำปฏิกิริยา oxidation โดยตรงกับผนังเซลล์ และ เยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารประกอบภายในเซลล์ (cell lysis) และปฏิกิริยาของอนุมูลตัวกลางที่ถูกทำลายด้วยโอโซน การถูกทำลายของส่วนประกอบของ nucleic acid (purines และ pyrimidines) ทำให้ carbon-nitrogen bonds แตกหักเสียหาย นำไปสู่กระบวนการ depolymerization และการทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย Khadre *et al.* (2001) พบว่าการทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้น้ำโอโซนแสดงการถูกทำลายของเยื่อหุ้มสปอร์ชั้นนอก อีกทั้งโอโซนยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ เช่น *Bacillus cereus* และ *Pseudomonas aeruginosa* เป็นต้น (Guzel-Seydim *et al.*, 2004)

จากประโยชน์ของโอโซน จึงมีการให้ความสนใจในการปรับใช้โอโซนกับวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อควบคุมการเน่าเสีย และทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง และมีความปลอดภัยในการบริโภค โดยประสิทธิภาพในการควบคุมการเน่าเสียนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช และความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ ดังการศึกษาผลของก๊าซโอโซนและอุณหภูมิในการเก็บรักษาแครอท โดยให้ก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ทุกวันๆ ละ 8 ชั่วโมง เป็นเวลา 28 วัน พบว่าที่ความเข้มข้น 60 ไมโครลิตร/ลิตร สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 50% และแครอทมีสีสว่างกว่าแครอทที่ไม่ได้ผ่านก๊าซโอโซน (Liew and Prange, 1994) ส่วนการศึกษาในผลแบล็คเบอรี่ พบว่าการรมด้วยก๊าซโอโซนในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิ 2 °C พบว่าสามารถลดการเน่าเสียของผลได้ 20% โดยลดการเจริญเติบโตของเชื้อรา เชื้อราหลักที่พบคือ *Botrytis cinerea* โดยที่สีผิวของผลมีสีที่สว่างขึ้น และที่ความเข้มข้น 0.3 ppm เมื่อเก็บรักษาได้ 12 วัน ซึ่งสามารถรักษาคุณภาพก่อนส่งไปสู่ตลาดได้ (Barth *et al.*, 1995) นอกจากนี้จากการศึกษาผลของก๊าซโอโซนต่อการเน่าเสียของผลองุ่น (*Vitis vinifera* L.) หลังการเก็บเกี่ยว พบว่า การใช้ก๊าซโอโซนในอัตรา 8 มิลลิกรัม/นาที นาน 20 นาที ทำให้จำนวน colony forming

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

units (CFU) ของเชื้อรา ยีสต์ และแบคทีเรียที่ผิวของผลองุ่นลดลง ทำให้เพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลองุ่นและลดการเน่าเสียที่เกิดจากเชื้อ *Rhizopus stolonifer* ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สามารถควบคุมการเน่าเสียได้ (Sarig *et al.*, 1996) และสามารถควบคุมเชื้อราแป้งที่พบในแตงกวา โดยลดการงอกของสปอร์ *Sphaerotheca fuliginea* (Khan and Khan, 1999) สามารถควบคุมเชื้อรา *Monilinia fructicola, Botrytis cinerera, Mucor piriformis* และ *Penicilium expansum* บนผิวของท้อพันธุ์ Elegant Lady เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 4 สัปดาห์ และยับยั้งเชื้อราสีเทาที่เกิดกับผลองุ่นพันธุ์ Thompsom Seedless ได้หลังจากเก็บรักษานาน 7 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 5°C (Palou *et al.*, 2003) เช่นเดียวกับการใช้โอโซนในการควบคุมการงอกของสปอร์เชื้อ *Penicillium digitatum* และ *P. italicum* ในผลส้มโดยรมด้วยโอโซน 0.72 ppm เป็นเวลา 14 วัน แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 12.8 °C ในภาชนะบรรจุต่างๆ กัน พบว่าโอโซนจะมีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อทั้งสองเมื่อใช้ภาชนะบรรจุแบบตะกร้าพลาสติก ซึ่งเป็นภาชนะที่ก๊าซสามารถผ่านทะลุได้ดี (Palou *et al.*, 2002) ส่วน Kell *et al.* (2001) ศึกษาผลของโอโซนในการเก็บรักษาข้าวโพด พบว่าเมื่อให้ก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 50 ppm นาน 3 วัน สามารถลดการสูญเสียข้าวโพดที่เกิดจากแมลงปีกแข็งได้ถึง 92 - 100% และยังสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus parasiticus* ได้ถึง 62% ส่วน Rusch and Laurence (1993) ศึกษาผลของโอโซนต่อโรค powdery mildew ในถั่ว (*Pisum sativum*) 2 สายพันธุ์ คือ Alaska และ Bounty ในโรงเรือนที่ควบคุมสภาพบรรยากาศและอุณหภูมิ โดยให้โอโซน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0, 0.06 และ 0.12 ไมโครลิตร/ลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน โดยรม 5 วัน แรกก่อนและหลังการ inoculation ด้วย conidia ของ *Erysiphe polygoni* ซึ่งเป็นเหตุของโรค powdery mildew ในถั่ว พบว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.12 ไมโครลิตร/ลิตร ยับยั้งการเกิดโรค powdery mildew ทั้ง 2 สายพันธุ์

สำหรับประเทศไทยได้ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ และอากาศเสียกันอย่างแพร่หลาย ส่วนการประยุกต์เพื่อใช้ในโรงงานส่งออกผักและผลไม้ และการลดพิษของสารตกค้างนั้น ยังมีข้อมูลสนับสนุนจากงานวิจัยของนักวิจัยน้อยมาก ดังเช่น สิดีริยา (2545) ศึกษาผลของโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไยพันธุ์ดอ โดยนำผลลำไยแช่ในน้ำเย็นที่ 0 °C แล้วปล่อยก๊าซโอโซนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บรักษาที่ 5 °C พบว่าผลของลำไยที่ผ่านการรมด้วยก๊าซโอโซนสามารถเก็บรักษาได้นานกว่าผลที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน 6 - 9 วัน และผลที่ผ่านการรมนาน 30 นาที ยังมีเซลล์ผิวเปลือกที่มีสภาพสมบูรณ์ และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ส่วนอรุโณทัย (2546) ศึกษาผลของโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาผลลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิ โดยแช่ผลลิ้นจี่ในน้ำโอโซนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 °C พบว่าผลลิ้นจี่ที่ผ่านการรมด้วยโอโซน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นาน 45 และ 60 นาที มีอายุการเก็บรักษานาน 28 วัน และผลลิ้นจี่มีการเน่าเสียน้อยว่าชุดควบคุม และการล้างถั่วงอกด้วยน้ำโอโซนที่ไหลผ่าน ที่ความเข้มข้น 0.03 ppm แล้วนำไปสะเด็ดน้ำ สามารถลดแบคทีเรียได้ (ฉันทวรรณและคณะ, 2545) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าการรมด้วยก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 200 ppm เป็นเวลา 60 นาที สามารถควบคุมการเน่าเสียของลำไยเมื่อเก็บรักษาที่ 5 °C เป็นเวลา 30 วัน โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหวาน และรสชาติของลำไย (Whangchai *et al.*, 2005) ซึ่งจากการทดลอง พบว่าการควบคุมโรคเนื่องจากผนังเซลล์ของเส้นใยหรือสปอร์เชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรค 2 ชนิด ได้แก่ *Lasiodiplodia* sp. และ *Cladosporium* sp. ถูกออกซิไดส์ด้วยโอโซนทำให้ mycelial ของเชื้อผิดปกติและการงอกของสปอร์ลดลง

ความเครียดต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในพืช

ความเครียดในพืช ได้แก่ ความร้อน ความหนาวเย็น โอโซน ความแห้งแล้ง และมลภาวะทางอากาศ รวมทั้งความเครียดจากสารออกซิแดนซ์ เป็นต้น โดยความเครียดเหล่านี้จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ หรือ free radical หมายถึงโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกสุดปราศจากคู่ เกิดขึ้นเมื่อวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของโมเลกุลหนึ่งๆ ได้รับอิเล็กตรอนเข้ามาหรือสูญเสียอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดไปหนึ่งอิเล็กตรอน

ชนิดของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระที่มีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ อนุมูลอิสระของออกซิเจน (oxy-radical) แต่อนุมูลอิสระอื่นๆ ก็มีบทบาทเช่นเดียวกัน เช่น nitric oxides (NO) และอนุมูลอิสระของกรดไขมันชนิดต่างๆ (ตาราง 5)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 5 ชนิดของอนุมูลอิสระ

	อนุมูลอิสระ	สูตรโครงสร้าง
Radicals	Superoxide	$O_2^{\bullet}$
	Hydroxyl radical	$HO^{\bullet}$
	Hydroperoxyl radical	$HOO^{\bullet}$
	Alkoxyl radical	$LO^{\bullet}$
	Lipid peroxy radical	$LOO^{\bullet}$
	Nitric oxide	$NO^{\bullet}$
	Thiyl radical	$RS^{\bullet}$
Non-radicals	Hydrogen peroxide	H_2O_2
	Singlet oxygen	$^1O_2$
	Hypochlorous acid	HOCl
	Peroxynitrite	$ONOO^-$
	Lipid hydroperoxide	LOOH

ที่มา : วารสารพิษวิทยาไทย (2547)

ออกซิเจนเป็นโมเลกุลจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต มีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการหายใจของพืชและสัตว์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการถ่ายทอดพลังงานที่แฝงอยู่ในโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นอาหาร เช่นแป้งหรือน้ำตาล แล้วก่อให้เกิดพลังงานเคมีในรูปของ ATP ที่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที ออกซิเจนโมเลกุล (O_2) ในสภาพปกติ (triplet ground stage : $^3\sum$) มีอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกสุดที่ไม่เข้าคู่อยู่สองอิเล็กตรอนและวิ่งในทิศทางขนานกัน ดังนั้นจึงเรียกว่าเป็นโมเลกุลชนิด biradical ไม่ค่อยไวปฏิกิริยา (non-reactive) กับสารอื่นๆ ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้อีก 4 อิเล็กตรอน กับ 4 โปรตรอน ได้เป็นน้ำตาม สมการ 4 ดังที่เกิดกระบวนการหายใจ

$$O_2 + 4e^- + 4\,H^+ \longrightarrow H_2O \qquad \text{สมการ 4}$$

โดยปกติออกซิเจนเป็นโมเลกุลที่จะไปออกซิไดส์โมเลกุลอื่นๆ ได้ยากจำเป็นต้องถูกกระตุ้นเสียก่อน หากออกซิเจนได้รับอิเล็กตรอนไปเพียง 1 หรือ 2 หรือ 3 อิเล็กตรอน จะกลายเป็นโมเลกุลที่ค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ง่าย สมการ 5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$O_2 \xrightarrow[H^+]{(1)\ e^-} {}^{\cdot}O_2^- \xrightarrow[H^+]{(2)\ e^-} H_2O_2 \xrightarrow[H^+]{(3)} {}^{\cdot}OH + OH^- \xrightarrow[H^+]{(4)} 2H_2O \quad \text{สมการ 5}$$

ในขั้นตอนแรก (1) นั้นเป็นปฏิกิริยาการดูดกลืนความร้อน (endothermic) ต้องมีการกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก ส่วนขั้นตอนที่เหลือเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ซึ่งเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous) โดยที่ขั้นตอน (2) อาจเกิดขึ้นได้โดยมีหรือไม่ต้องมีเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เร่งปฏิกิริยาก็ได้ ในขณะที่ขั้นตอน (3) ต้องอาศัยเอนไซม์ catalase (CAT) ส่วนขั้นตอนสุดท้าย (4) ไม่ต้องอาศัยเอนไซม์ใดๆ

จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะได้อนุมูลอิสระเกิดขึ้นซึ่ง superoxide ($^{\cdot}O_2^-$) และ hydroxyl radical ($^{\cdot}OH$) เป็นอนุมูลอิสระที่มีฤทธิ์ค่อนข้างแรงสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ได้ง่าย โดยเฉพาะ hydroxyl radical นั้นมีฤทธิ์แรงมากกว่าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ได้ทุกชนิด (un-selective) ทำให้โมเลกุลของโปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิกเสียหายได้ง่าย และส่งผลให้เกิดการทำงานของเอนไซม์ เยื่อหุ้มสารพันธุกรรมต่างๆ ทำงานผิดไป ส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ peroxide (H_2O_2) ไม่ใช่อนุมูลอิสระแต่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ โดยเฉพาะในสภาพที่มีโลหะหนัก จึงมีชื่อเรียกโมเลกุลเหล่านี้รวมๆ กันว่า active oxygen species (AOS) หรือ reactive oxygen intermediates (ROI) (จริงแท้, 2549)

ตัวอย่างของสาร reactive oxygen species (ROS) ได้แก่

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีเสถียรภาพคงตัวเมื่อบริสุทธิ์ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงเกิดการออกซิเดชันสารอินทรีย์ได้ยากมาก ภายในสภาวะของการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปและมักจะเป็นไปไม่ได้เลย ถ้าปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอล (Marecheal *et al.*, 1997) สมการ 6

$$H_2O_2 \xrightarrow{\text{catalase}} 2OH^{\bullet} \quad \text{สมการ 6}$$

$2OH^{\bullet}$ มีศักยภาพในการออกซิเดชัน (oxidation potentials) สูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ สมการ 7 (Arslan *et al.*, 1999)

$$2O_3 + H_2O_2 \longrightarrow 2OH^{\bullet} + 3O_2 \quad \text{สมการ 7}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

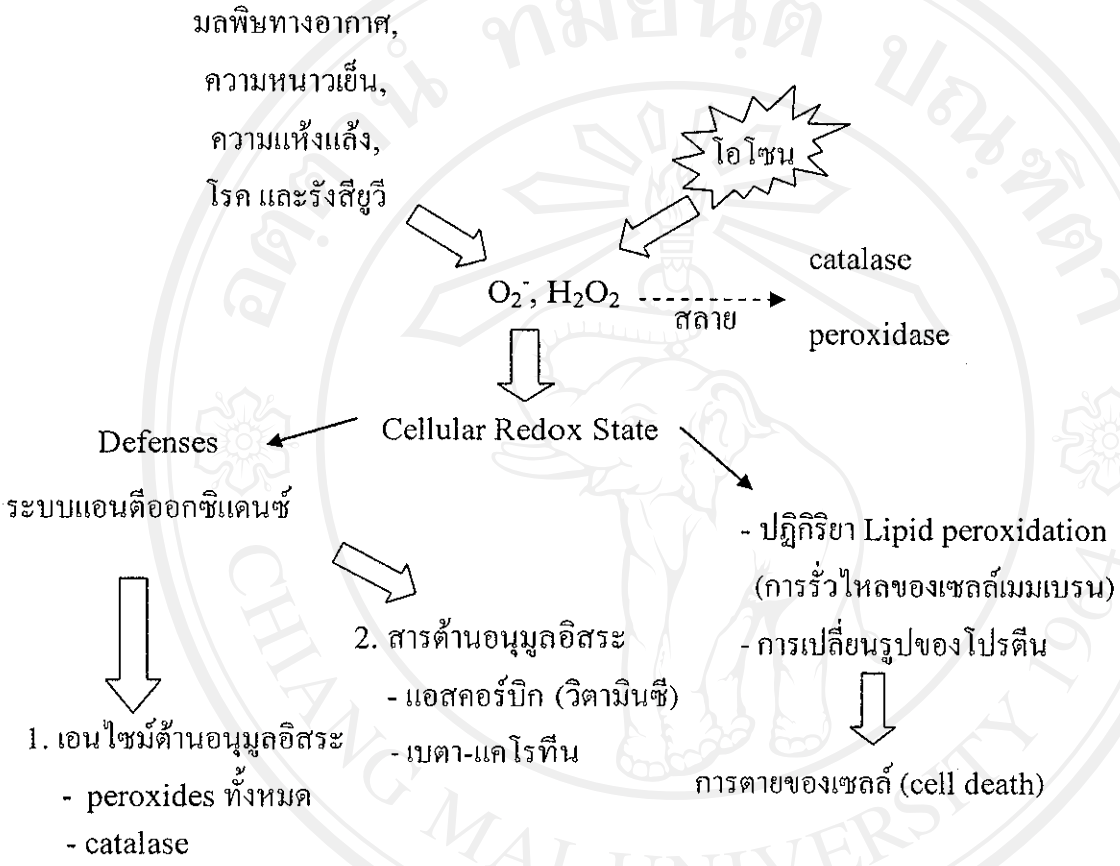
Shewfelt and Rosario (2000) จึงได้เสนอคำอธิบายหรือสมมติฐานการเกิดอาการผิดปกติทางสรีรวิทยาต่างๆ ในผักผลไม้ว่าเป็นการตอบสนองต่อความเครียดจากสภาพการเก็บรักษา ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง ปริมาณออกซิเจนต่ำ หรือการมีแสงมากเกินไป เนื่องจากในสภาพเก็บรักษาดังกล่าวข้างต้นมีผลในการกระตุ้นอนุมูลอิสระ (free radical) ชนิด reactive O_2 เช่น $O_2^{\bullet -}$, H_2O_2, และ $HO^{\bullet}$ เพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปอนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาจากขั้นตอนของกระบวนการต่างๆ ตามปกติภายในเซลล์ เช่น กระบวนการหายใจ (respiration) หรือ การสังเคราะห์โปรตีน (protein synthesis) เป็นต้น และในสิ่งมีชีวิตต่างๆ ก็มีกลไกการควบคุมระดับของอนุมูลอิสระ โดยอาศัยสารประกอบต่างๆ ในกระบวนการทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ของอนุมูลอิสระ เพื่อไม่ให้อนุมูลอิสระมีมากขึ้นจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ สารประกอบต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า ตัวต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ซึ่งมีทั้งที่เป็นและไม่เป็นเอนไซม์ (Purvis and Shewfelt, 1993)

โดยธรรมชาติแล้วสิ่งมีชีวิตทุกชนิดมีกระบวนการต่อต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant defense mechanism) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ ที่จะเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดและขัดขวางอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ (จุฑามาส, 2542) ในกรณีที่อนุมูลอิสระถูกกระตุ้นให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติเกินไปจนระบบต่อต้านอนุมูลอิสระไม่เพียงพอที่จะกำจัดอนุมูลอิสระได้ จะส่งผลให้เกิดภาวะผิดปกติ คือ ภาวะอนุมูลอิสระเกิน (oxidative stress) หรือการเกิดปริมาณอนุมูลอิสระภายในเซลล์ที่สูงจนเกินไป ซึ่งมีผลให้โปรตีน ไขมัน และ ดีเอ็นเอ เสียหาย (Halliwell, 1991)

บทบาทของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณในการตอบสนองของพืชต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งสภาพแวดล้อมทางชีววิทยาและสภาพแวดล้อมทางกายภาพซึ่งสามารถสรุปได้ (ภาพ 1)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 1 บทบาทของอนุมูลอิสระ (Mulpuri *et al.*, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระ

กลไกหลักในการกำจัดอนุมูลอิสระประกอบด้วยตัวต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant enzyme) ซึ่งทำงานรวมกันเป็นระบบ เรียกว่า ระบบต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant system)

เอนไซม์หลักในระบบต้านอนุมูลอิสระประกอบด้วย superoxide dismutase, APX และ catalase (ตาราง 6) ส่วนตัวต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก glutathione, วิตามินอี (α-tocopherol) และแคโรทีนอยด์ (ตาราง 7)

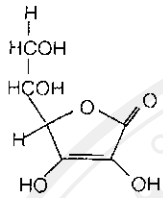
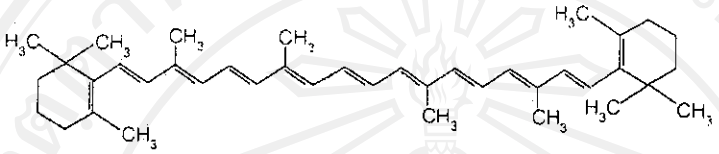
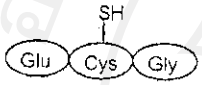
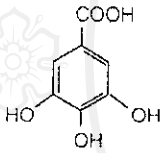
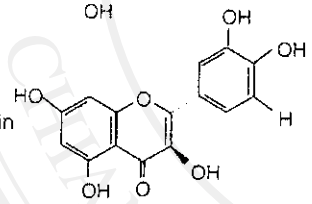
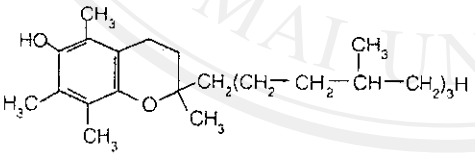
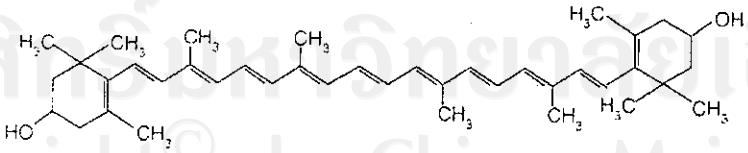
ตาราง 6 สารต้านอนุมูลอิสระของพืชที่ตอบสนองจากความเครียด

สารต้านอนุมูลอิสระ	ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเครียด
ascorbate concentration	แสงและความหนาวเย็น
	ปริมาณออกซิเจนสูง
superoxide dismutase	ความแห้งแล้ง
	ความร้อน
	ปริมาณออกซิเจนสูง
	แสงและความหนาวเย็น
	โอโซน
	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
ascorbate peroxidase	ความแห้งแล้ง
	ปริมาณออกซิเจนสูง
	แสงและความหนาวเย็น
	โอโซน
	paraquat
catalase	โอโซน
	อุณหภูมิต่ำ

ที่มา : Sami (1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 7 ชนิดของตัวต้านทานอนุมูลอิสระและแหล่งที่พบภายในเซลล์

ตัวต้านออกซิเดชัน	โครงสร้าง	แหล่งที่พบในเซลล์
กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี)		ไซโทซอล, พลาสทิด แวคิวโอล, apoplast
เบตา-แคโรทีน		พลาสทิด
glutathione, รูปรีดิวซ์ (GSH)		ไซโทซอล, ไมโทคอนเดรีย, พลาสทิด
กรด gallic		แวคิวโอล
ฟลาโวนอยด์ quercetin		แวคิวโอล
oolyamines (เช่น putrescine)	$H_2N[(CH_2)_4NH_2]$	ไซโทซอล, ไมโทคอนเดรีย, นิวเคลียส, พลาสทิด
α-tocopherol (วิตามินอี)		เยื่อหุ้มเซลล์, เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์
zeaxanthin		คลอโรพลาสต์

ที่มา : จริงแท้ (2549)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants)

สารต้านอนุมูลอิสระ จึงหมายถึงสารใดๆ ที่มีอยู่ในความเข้มข้นต่ำๆ ก็สามารถต้านหรือลดอนุมูลอิสระ ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงมีความหมายกว้างๆ ที่รวมถึง สารใดๆ ก็ตามที่สิ่งมีชีวิตใช้เพื่อป้องกันตนเองจากความเป็นพิษที่เกิดจากอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ป้องกันดังกล่าวอาจเกิดได้ทั้งจากความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการยับยั้งการสร้างอนุมูลอิสระ หรือจับกับอนุมูลอิสระแล้วทำให้อนุมูลอิสระสูญเสียความสามารถในการเข้าทำลายเซลล์ สารต้านอนุมูลอิสระต่างชนิดกันจะมีกลไกการทำงานที่แตกต่างกัน หรืออาจเสริมฤทธิ์การทำงานซึ่งกันและกันอันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระได้ (วารสารพิษวิทยาไทย, 2547)

อนุมูลอิสระทั้งที่อยู่ในรูป radicals และ reactive species ต่างๆ เหล่านี้ เมื่อเกิดขึ้นภายในเซลล์แล้วจะมีการกำจัดด้วยระบบที่อาศัยตัวต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant defence) ซึ่งมีทั้งระบบที่ใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ แต่ถ้าหากระบบดังกล่าวมีไม่เพียงพอหรือประสิทธิภาพลดลงก็จะเกิดความเครียดจากอนุมูลอิสระ (oxidative stress) ขึ้น อนุมูลอิสระเข้าไปทำลายลิปิด โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และดีเอ็นเอ (Halliwell, 1991) ก่อให้เกิดความเสียหายในระบบต่างๆ ของสิ่งมีชีวิต (Stadler, 1998) นำไปสู่การตายของเซลล์ได้ (Maxwell, 1995)

กิจกรรมของตัวต้านอนุมูลอิสระในการกำจัด oxygen radicals มีอัตราส่วนที่ผกผันกับระดับของการเกิด lipid peroxidation การสังเคราะห์เอทิลีนและการวาย (Dhindsa *et al.*, 1981) โดยในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ เซลล์จะดำรงอยู่และมีพัฒนาการไม่ได้เลย หากปราศจากระบบป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidation defense system) ที่ซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยระบบที่เป็นเอนไซม์ (enzymatic) และระบบที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic) (Cao and Prior, 2002) ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองกลุ่มนี้ มีความสำคัญในการป้องกัน oxidative injury เนื่องจากมีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ก่อนที่เซลล์จะถูกทำลาย ซึ่งเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ oxy-radical detoxification ในเนื้อเยื่อพืชนี้ได้แก่ superoxide dismutase, peroxidase และ catalase เป็นต้น (Salin, 1987)

ยังสามารถแบ่งประเภทของสารต้านอนุมูลอิสระตามกลไกในการทำงานได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. Antioxidant proteins

Antioxidant proteins มีหน้าที่ลดการเกิดอนุมูลอิสระ และ reactive oxygen species (ROS) ที่เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ได้แก่ albumin, ceruloplasmin, metallotothioneins, transferritins และ heat shock proteins เป็นต้น โปรตีนโดยปกติมีความสัมพันธ์กับการเกิด stress หรือ โรคของพืชที่จะมีการสร้าง reactive oxygen species

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดังนั้นพืชอาจมีการสร้าง endogenous component, antioxidant defense protein และ metabolites ที่จำเป็นต่อหน้าที่หลักของเซลล์ (Larrigaudiere *et al.*, 2004) ศิริโสภา (2546) พบว่าการใช้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทำให้แถบโปรตีนในเปลือกลำไยน้ำหนักโมเลกุลต่ำแต่เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน พบจำนวนแถบ โปรตีน 18 แถบ ไม่เปลี่ยนแปลงในทุกกรรมวิธี ส่วนการศึกษาของ Sabehat *et al.* (1996) ที่รายงานว่าผลมะเขือเทศที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 38 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีการสังเคราะห์ heat shock proteins (HSPs) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 70 กิโลดาลตัน และโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 18 - 21 กิโลดาลตัน และพบว่าผลมะเขือเทศที่ได้รับอุณหภูมิดังกล่าวแสดงอาการสะท้านหนาวน้อยกว่าผลมะเขือเทศชุดควบคุม จึงเชื่อว่า HSPs ที่ถูกสร้างขึ้นเป็นกลุ่มโปรตีนที่ทำหน้าที่เหมือน molecular chaperone ที่จับกับโปรตีนที่เสียสภาพเนื่องจากสภาพเครียดต่างๆ แล้วทำให้เกิดการรวมตัวสร้างเป็นโปรตีนที่สมบูรณ์อีกครั้ง เช่นเดียวกับ Woolf *et al.* (1995) รายงานว่าผลสาลี่ที่ได้รับอุณหภูมิสูงจะมีการสังเคราะห์ heat shock proteins (HSPs) ลดลงโดยไปทำให้ mRNA เกิดการสลายตัว ทำให้การสังเคราะห์โปรตีนลดลง ส่วน วีรพล (2546) ทำการศึกษาแถบโปรตีนในการแช่มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 °C นาน 30, 45, 60 และ 75 นาที แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C พบว่ามีแถบโปรตีนที่เห็นชัดเจนจำนวน 36 แถบในทุกกรรมวิธี แต่ผลมะม่วงที่แช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C นาน 60 และ 75 นาที มีแถบโปรตีนหลักน้อยกว่าชุดควบคุม 1 แถบ และเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 วัน ไม่พบแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 16.06 - 16.36 กิโลดาลตัน ในทุกกรรมวิธี ซึ่งคาดว่าการได้รับอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานมีผลทำให้เกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนรูปของโปรตีนบางชนิด (Ferguson *et al.*, 1994)

2. Antioxidant enzymes หรือเอนไซม์ต้านออกซิเดชัน

Antioxidant enzymes มีหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาในการทำให้อนุมูลอิสระเป็นกลางด้วยการรวมอิเล็กตรอนอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase, catalase และ peroxidases มีหน้าที่สำคัญในการลดปริมาณอนุมูลอิสระภายในเซลล์ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ สมการ 8 - 10

2.1 superoxide dismutase

$2 + 2H^+ \longrightarrow H_2O_2 + O_2$ สมการ 8

2.2 catalase (CAT)

$H_2O_2 \longrightarrow 2H_2O_2 + O_2$ สมการ 9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3 peroxidase (POD)

$$H_2O_2 + AH_2 \longrightarrow 2H_2O_2 + O_2 \qquad \text{สมการ 10}$$

Wang (1995) รายงานการเกิดอาการสะท้านหนาวในแตง Zucchini (*Cucurbita pepo* L., cv. 'Elite') โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบอาการระหว่างผลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C กับผลที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 2 วัน แล้วจึงย้ายมาเก็บรักษาที่ อุณหภูมิ 5 °C พบว่ามีกิจกรรมของเอนไซม์ superoxide dismutase สูงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ส่วนกิจกรรมของเอนไซม์ catalase นั้น มีอัตราการลดลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ไม่ได้ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15 °C มาก่อน เช่นเดียวกับ Schoner and Krause (1990) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดต่างๆ ได้แก่ catalase และ superoxide dismutase ถึงการตอบสนองของป่วยเล้งในการต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ พบว่ามีพืชมีความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำโดยการสร้าง superoxide dismutase เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Hull *et al.* (1997) ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณเอนไซม์ในใบของต้นข้าวโพดที่เจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 14 °C และ 25 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 14 °C มีปริมาณของเอนไซม์ superoxide dismutase สูงกว่าที่อุณหภูมิ 25 °C สัมพันธ์กับ Prasad *et al.* (1994) รายงานว่า catalase มีผลต่อความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำในต้นกล้าข้าวโพด โดยเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ Prasad (1997) พบว่า aminotriazole (AT) สามารถยับยั้งการทำงานของ catalase และปริมาณของ catalase ที่ลดลง ส่งผลให้พืชแสดงอาการสะท้านหนาวได้ ดังนั้น catalase จึงมีบทบาทสำคัญต่อการชักนำให้เกิดความต้านทานต่ออาการสะท้านหนาวในต้นกล้าข้าวโพด เช่นเดียวกับการตอบสนองของต้นกล้ามะเขือเทศที่อ่อนแอต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวเมื่อได้รับอุณหภูมิต่ำ (Kerdnaimongkol *et al.*, 1997) ต่อมา Sala and Lafuente (2000) ได้ศึกษา hot treatment แก่ผลส้มก่อนเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าผลส้มมีความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำได้ดี โดยมีกิจกรรมของเอนไซม์ catalase ที่เพิ่มขึ้นชัดเจน ส่วน superoxide dismutase แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในผลส้มที่ได้รับและไม่ได้รับสาร 3-amino-1,2,4-triazole ซึ่งเป็นสารที่ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ catalase ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์ catalase จึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ผลส้มมีความทานต่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ ลดาศิริ (2542) ได้ทำการศึกษาในผลมะละกอพันธุ์ซันไรส์ที่เก็บรักษา 20, 13 และ 5 °C และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 42 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C พบว่าผลมะละกอที่เก็บรักษาโดยได้รับอุณหภูมิสูงก่อนการเก็บรักษา สามารถลดการเกิดอาการสะท้านหนาวได้ นอกจากนั้นยังพบว่าอุณหภูมิสูงก่อนการเก็บรักษามีผลต่อการป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยมีผลในการชะลอการลดลงของกิจกรรมของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอนไซม์ superoxide dismutase, catalase และปริมาณ peroxides ทั้งหมด น้อยกว่าผลมะละกอที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C ส่วน Takahama *et al.* (1999) รายงานว่าใน cell พืชมีระบบ antioxidative ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ เช่น catalase, peroxidase และ superoxide dismutase และ สารต้านอนุมูลอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดแอสคอร์บิก, glutathione และ α-tocopherol ทำลายใน ผลพริกไทย (pepper) หลายปีถัดมา Anderson and Padhye (2004) ได้เปรียบเทียบระหว่างต้นถั่วลันเตาพันธุ์ต้านทานและพันธุ์อ่อนแอต่ออาการสะท้านหนาว พบว่าภายในใบของพันธุ์ต้านทานจะมีปริมาณ catalase สูงกว่าพันธุ์อ่อนแอ แต่ไม่พบว่าความแตกต่างของปริมาณอนุมูลอิสระในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อมา Zhulong and Tian (2006) ศึกษาในผลเชอรี่หวานหลังจากปลูกเชื้อ *P. expansum* แล้วนำไปให้ด้วย yeast ปฏิปักษ์ ได้แก่ *Pichina membranefaciens* ที่ความเข้มข้น 5 x 10^7 เซลล์/เมตร โดยเปรียบเทียบกับ salicylic acid (SA) ที่ 0.5 mM นาน 10 นาที พบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองสามารถลดเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคได้ โดยทำให้ catalase activity ลดลง แต่ SOD activity เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของเมแทบอลิซึมในผลลำไยที่เกิดขึ้นหลังจากได้รับโอโซนยังมีการศึกษากันน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยในพืชบางชนิดพบว่าเซลล์พืชจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนอย่างรวดเร็วเมื่อพืชได้รับความเครียดต่างๆ เช่นการขาดน้ำ (Walter *et al.*, 1990) หรืออุณหภูมิต่ำ (Watkins *et al.*, 1990 ; Vierstra, 1993) โดยโอโซนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของพืชต่างๆ เช่นเดียวกับการได้รับความเครียด (stress) อื่นๆ เช่น โอโซนกระตุ้นให้พืชสร้างสาร phytoalexin หลังจากเก็บรักษาช่วยลดการเกิดโรคบนผิวองุ่นได้ ทำให้มีการสังเคราะห์เอทธิลีนเพิ่มขึ้น (Mehlhorn and Wellburn, 1987) และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและปริมาณของโปรตีนในต้นยาสูบ (Schraudner *et al.*, 1992) รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก oxidative stress เช่น โอโซน, รังสียูวี (UV) และเชื้อสาเหตุโรคพืช เป็นต้น ทำให้พืชสร้างระบบแอนตีออกซิแดนซ์ (antioxidant system) ได้แก่ anti-oxidative enzymes เช่น superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase (APX), glutathione peroxidase (GPX), และ glutathione reductase (GR) และการสร้างสารแอนตีออกซิแดนซ์ เช่น กรดแอสคอร์บิก แคโรทีนอยด์ (carotenoids) และ glutathione (GSH) (Mittler, 2002)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. Antioxidant scavenging หรือ Free radical scavenging

ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก วิตามินอี (α-tocopherol), urate, glutathione, β-carotene และ lycopene เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถเข้าจับกับอนุมูลอิสระเพื่อขัดขวางในการเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุล เช่น โปรตีน ไขมัน และดีเอ็นเอ เท่ากับเป็นการตัดโซ่ของปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ โดยช่วยในการยับยั้งการเกิด initiation reaction และช่วยลดการเกิด propagation reaction ดังนั้นปริมาณของอนุมูลอิสระจะลดลง แต่เกิดเป็นอนุมูลอิสระของตัวต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งจะสามารถรวมตัวกันเป็นกลางและได้เป็นตัวต้านอนุมูลอิสระกลับคืนมา ทั้งนี้ปริมาณของตัวต้านอนุมูลอิสระต้องมีมากเพียงพอที่จะเข้าจับกับอนุมูลอิสระได้อย่างรวดเร็วก่อนที่ปฏิกิริยาลูกโซ่จะดำเนินต่อเนื่องไป มิฉะนั้นก็จะทำให้เกิดภาวะอนุมูลอิสระได้ (ภาพ 2)

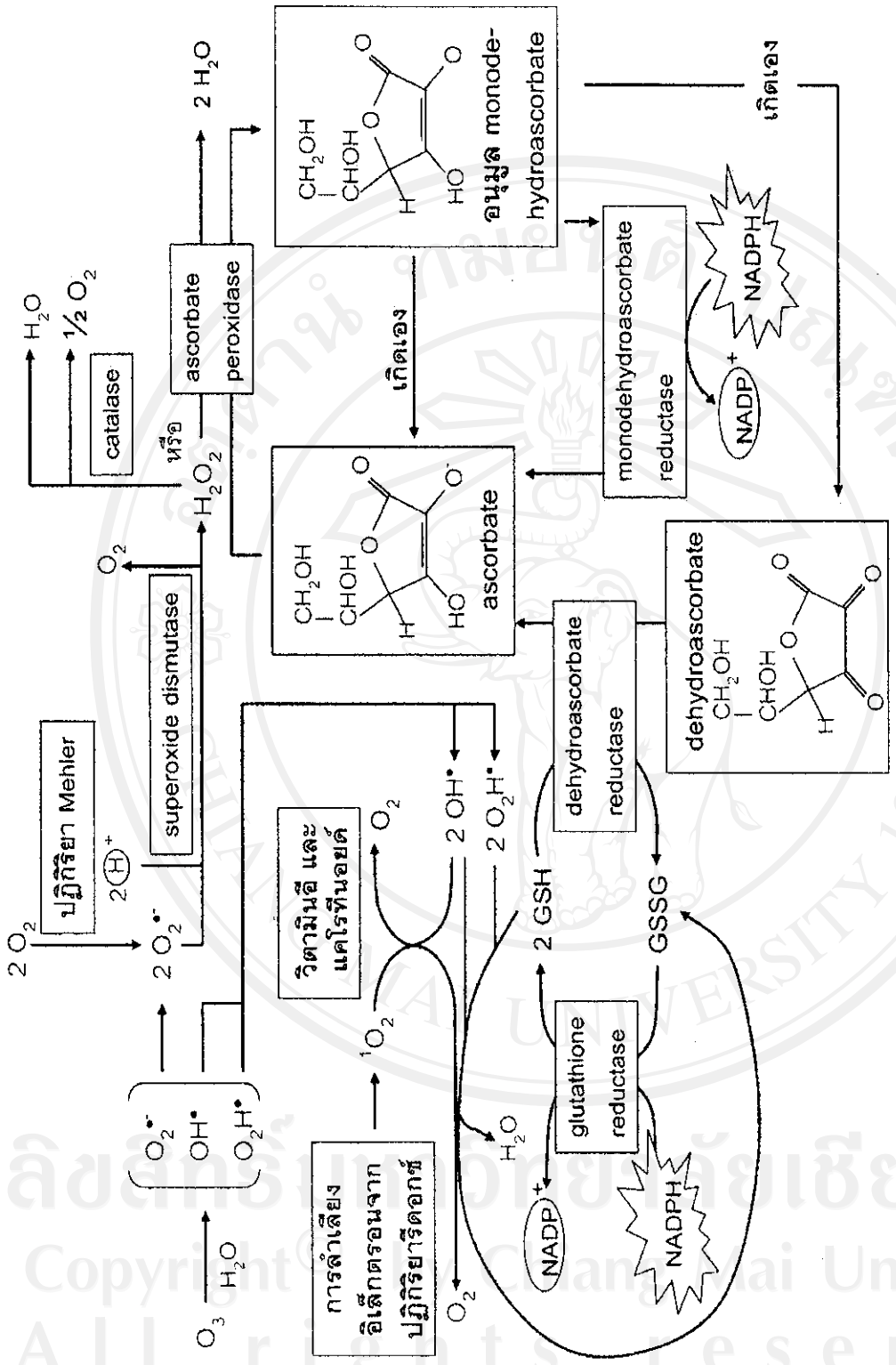
สมบัติทางเคมีของแอสคอร์บิกในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเกิดเป็น ascorbate radical ($Asc^{\bullet-}$) ที่เสถียรมากเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นเรโซแนนซ์ (resonance structure) โดยอนุมูลอิสระตัวอื่น เช่น glutathione ($^{\bullet}GS$) และวิตามินอี หรือ tocopherol ($^{\bullet}Toc$) ก็สามารถรับ H จากแอสคอร์บิกได้เช่นกัน นอกจากนี้แอสคอร์บิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความสำคัญ และมีประสิทธิภาพสูงละลายน้ำได้ จึงมีบทบาทในการต้านทานอนุมูลอิสระในพลาสมา (วัชรี, 2549) ซึ่งชนิดของตัวต้านทานอนุมูลอิสระและแหล่งมาที่พบในเซลล์ (ตาราง 7) และมีกลไกการกำจัดอนุมูลอิสระทั้งที่ใช้และไม่ใช้เอนไซม์ในพืช (ภาพ 2)

Sandermann *et al.* (1998) ศึกษาในยาสูบที่ตอบสนองต่อโอโซน โดยจะมีการกระตุ้น oxygen species สามารถอธิบายโดยการกลายพันธุ์ของ *Arabidopsis* ซึ่งพบว่าปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลง จากการกระตุ้นด้วยก๊าซโอโซน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และรังสียูวีบี ส่วน Annamari *et al.* (2000) พบว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 150 ppb เป็นเวลา 4 วัน วันละ 4 ชั่วโมง ในทานตะวันช่วยกระตุ้นการเพิ่มขึ้นของ ascorbate โดยทำให้มีการออกซิเดชันของ ascorbate ซึ่งโอโซนมีผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ ชักนำในการเสื่อมสภาพเร็ว (senesecnce) ทำให้ผนังเซลล์อ่อนนุ่มลดลง ซึ่งอาจจะเป็นผลจาก mechanical resistance against ของ abiotic stress ที่ถูกชักนำโดยโอโซน ความสัมพันธ์ระหว่างโอโซนกับองค์ประกอบของการเกิด ROS ในapoplast ชนิดต่างๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับ free radicals $OH^{\bullet}$, $O_2^{-\bullet}$ และ peroxides (H_2O_2, R_2O_2) ซึ่งจะสามารถทำลายส่วนประกอบของ plasma membranes เช่น โปรตีน และ ไขมัน (lipids) นอกจากนี้ Padayatty *et al.* (2002) ยังพบว่าเนื้อเยื่อของผลิตผลที่อ่อนแอต่อการเกิดการสะท้านหนาว (chilling injury) จะมีปริมาณของกรดแอสคอร์บิกน้อยกว่าเนื้อเยื่อที่ต้านทาน เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวต้านทานอนุมูลอิสระมีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ 2 ตัว หลังเปลี่ยนมาอยู่ในรูป dehydroascorbic acid (DHA) จากนั้น DHA สามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในรูปของกรดแอสคอร์บิกได้อีกโดยอาศัย glutathione ส่วน Ariel *et al.* (2006) ศึกษาในสตรอเบอรี่ที่ถูกให้ความร้อน (heat-treated) อุณหภูมิ 45 °C นาน 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 0, 7 และ 14 วัน และนำไปเก็บไว้ที่ 20 °C เป็นเวลา 2 วัน พบว่ากรดแอสคอร์บิกมีปริมาณมากกว่าชุดควบคุม แต่ไม่แตกต่างกันเมื่อนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 °C หลังเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 °C ปริมาณกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้นใน heat-treated มากกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าผลที่มีปริมาณกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจาก heat treatment ทำให้มีปริมาณ total antioxidant capacity เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ Conklin and Barth (2004) พบว่าโอโซนมีความสัมพันธ์กับระดับของกรดแอสคอร์บิก โดยกรดแอสคอร์บิกในระดับ ROS จะช่วยป้องกันการเกิดช่องว่างใน apoplast นอกจากนี้แอสคอร์บิกยังช่วยลดความเป็นพิษในเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายโดยโอโซน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2 กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระที่ใช้และไม่ใช้เอนไซม์ในพืช (จิรงแท้, 2549)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved