

## การตรวจเอกสาร

### 1. สรีรวิทยาของหน่อไม้ฝรั่ง

#### 1.1 ลักษณะทั่วไป

หน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* L.) อยู่ในวงศ์ Liliaceae เป็นพืชพื้นเมืองที่พบในยุโรปตอนใต้ และทางตะวันออกเฉียงใต้ทางแถบประเทศชายฝั่งเมดิเตอร์เรเนียน (Thompson, 1931) เป็นพืชผักที่มีลำต้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ลำต้นใต้ดิน และลำต้นเหนือดิน

ลำต้นใต้ดิน อาจถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบรากรวมเรียกว่า rhizome หรือเหง้า อาหารของหน่อไม้ฝรั่งจะถูกส่งมาเก็บที่ส่วนนี้ ลำต้นใต้ดินมีลักษณะเป็นแท่งคล้ายแท่งดินสอ งอกกระจายออกเป็นรัศมีโดยรอบ เรียกอีกอย่างว่า crown ระบบรากแผ่ขยายออกไป ประมาณ 0.9 – 1.5 เมตร หรือมากกว่านั้น ยอดอ่อนหรือหน่ออ่อน (spear) เจริญมาจากเหง้า เป็นส่วนที่ใช้รับประทาน ถ้าปล่อยให้หน่ออ่อนเจริญเติบโตจะกลายเป็นลำต้นเหนือดิน ซึ่งมีความสูง 1.5 - 2 เมตร

ลำต้นเหนือดิน มีใบเป็นเกล็ดบาง ๆ ติดอยู่ตามข้อ ส่วนที่เห็นเป็นลักษณะคล้ายเส้นขน (ที่เรียกกันว่าใบ) แท้จริงเป็นส่วนของกิ่งก้านที่เปลี่ยนไปทำหน้าที่ใบ เรียกว่า cladode หรือ cladophyll, ต้นเพศผู้และเพศเมียแยกกันอยู่คนละต้น (dioecious), ดอกมีขนาดเล็ก มีจำนวนมากและเกิดตามกิ่งก้าน ส่วนผลมีลักษณะกลม ขนาดเล็ก มีสีเขียวเมื่ออ่อนและสีแดงส้ม เมื่อสุก มีเมล็ดอยู่ภายในผลละ 2-3 เมล็ด เปลือกหุ้มเมล็ดสีดำ

หน่อไม้ฝรั่งเจริญเติบโตได้ดี ในสภาพดินร่วนซุยระยาะน้ำดี pH 6-6.7 อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-30°C หน่อไม้ฝรั่งที่ปลูกในประเทศไทย สามารถจำหน่ายได้ทั้งในและต่างประเทศ โดยเฉพาะในปัจจุบันตลาดต่างประเทศมีความต้องการหน่อไม้ฝรั่งมาก ทำให้มีโครงการเร่งรัดการผลิตหน่อไม้ฝรั่ง โดยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานของรัฐบาลและเอกชน ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดนนทบุรี นครปฐม ราชบุรี เพชรบุรี กาญจนบุรี ชลบุรี เพชรบูรณ์และประจวบคีรีขันธ์ พันธุ์หน่อไม้ฝรั่งที่เกษตรกรนิยมใช้ในการปลูกมี 5 พันธุ์ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541ก) คือ

1. แมรีวอชิงตัน (Mary Washington) เป็นพันธุ์แรกที่ถูกนำเข้ามาปลูกในประเทศไทย พันธุ์นี้ให้ผลดีพอสมควรเหมาะที่จะปลูกทั้งแบบหน่อขาวและหน่อเขียว แต่ปัจจุบันไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากให้ผลผลิตต่ำกว่าพันธุ์อื่น
2. แคลิฟอร์เนีย 500 (California 500) เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตใกล้เคียงกับพันธุ์แมรีวอชิงตัน หน่อไม้ฝรั่งพันธุ์นี้มีอายุเก็บเกี่ยวเร็ว สามารถปลูกได้ทั้งแบบหน่อขาวและหน่อเขียว
3. แคลิฟอร์เนีย 309 (California 309) พันธุ์นี้จากการทดสอบของศูนย์วิจัยพืชผักเขต ร้อนพบว่า เป็นพันธุ์ที่แข็งแรงมีแนวโน้มในการให้ผลผลิตที่ดีกว่าและขนาดของหน่อใหญ่กว่าสอง พันธุ์แรกเล็กน้อย สามารถปลูกได้ทั้งแบบหน่อขาวและหน่อเขียว
4. ไฮบริดอิมพีเรียล (Hybrid Imperial) เป็นพันธุ์ลูกผสมช่วงที่ 2 ให้ผลผลิตค่อนข้างสูงกว่า 3 พันธุ์ที่กล่าวมา สามารถปลูกได้ทั้งแบบหน่อขาวและหน่อเขียวเช่นกัน
5. บร็อกคิมพรวูฟ (Brock's Improved) เป็นพันธุ์ลูกผสมช่วงที่ 1 ซึ่งให้ผลผลิตสูงกว่า 4 สายพันธุ์ที่กล่าวมา จึงทำให้เมล็ดพันธุ์มีราคาแพงมาก ปลูกได้ทั้งแบบหน่อขาวและหน่อเขียว เช่นกัน

ในปัจจุบันได้มีการนำหน่อไม้ฝรั่งเข้ามาทดลองปลูกอีกหลายพันธุ์ ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่ใช้ปลูกทั้งแบบหน่อขาว และหน่อเขียว เช่น เจนลิม, แฟรงค์ลิม, ยูซี 157, บูนลิม, แบคลิม และพันธุ์อื่น ๆ ซึ่งยังอยู่ในช่วงของการทดสอบผลผลิตอยู่

## 1.2 ข้อมูลสถิติ และลักษณะที่เป็นที่ต้องการของตลาด

หน่อไม้ฝรั่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพในการส่งออกสูง โดยในปี พ.ศ. 2541 มีมูลค่าการส่งออกหน่อสดหรือแช่เย็นถึง 199.3 ล้านบาท (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2543) โดยตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น ไต้หวัน ฮองกง สิงคโปร์ มาเลเซีย ออสเตรเลียและอังกฤษในรูปหน่อเขียว โดยมีการส่งออกทั้งในรูปสด และแปรรูป ในปี พ.ศ. 2548 มีมูลค่าการส่งออกถึง 1,131.9 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2548) สำหรับภายในประเทศพบว่า เป็นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย มีวางขายทั่วไปทั้งในตลาดสด และห้างสรรพสินค้า

การเก็บเกี่ยวหน่อไม้ฝรั่งจะเริ่มเมื่ออายุ 10 เดือนขึ้นไปหลังจากเพาะเมล็ด หน่อไม้ฝรั่งที่มีคุณภาพดีหลังเก็บเกี่ยวปลายหน่อจะต้องแน่น ไม้บาน เรียกว่า หน่อตูม ซึ่งต้องไม่มีช่อใบเทียม (cladodes) โพล์พื้นใบแท้ที่ปกคลุมอยู่บริเวณยอดของหน่อ สำหรับหน่อบาน ปลายหน่อบานได้เล็กน้อยไม่มีใบเทียม โพล์พื้นแขนงใบแท้ที่ปกคลุมอยู่บริเวณยอดของหน่อ หน่อของหน่อตูมและหน่อบานต้องตั้งตรง ไม่คดงอหรือแคะแกระรีน หน่อสดจะมีสีแตกต่างกัน คือ หน่อสีขาวเป็นหน่อที่ผลิตโดยใช้ดิน หรืออินทรีย์วัตถุกลบ หรือปูน โคนก่อนเพื่อสร้างหน่อขาว และเก็บเกี่ยวเมื่อหน่อโพล์พื้นดินประมาณ 1 เซนติเมตร โดยการขุดดินรอบ ๆ หน่อออก แล้วใช้มีดตัดตรงโคนหน่อ หลังจากนั้นจึงกลบดินไว้อย่างเดิม (ผาดิพงษ์, 2527) หน่อขาวที่มีคุณภาพดีต้องตรงและยาวไม่เกิน 22 เซนติเมตร มีสีขาวที่ยอดไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร การรับซื้อเข้าโรงงานจะแบ่งตามเกรด คือ เกรดเอ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร เกรดบี มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 – 1.2 เซนติเมตร เกรดซี มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร และหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ได้คุณภาพ ส่วนการเก็บเกี่ยวหน่อเขียวจะเริ่มต้นเมื่อหน่ออ่อนแทงพื้นดินประมาณ 20 – 30 เซนติเมตร โดยนิยมใช้มือหักหน่อเหนือระดับพื้นดิน ขนาดของหน่อเขียวแบ่งเป็น 3 เกรด คือ เกรดเอ บี และซี ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โคนหน่อ คือ 1.0, 0.8 และ 0.6 เซนติเมตรขึ้นไปตามลำดับ ทุกเกรดยาว 25 เซนติเมตร มีส่วนที่เป็นหน่อเขียวยาว 18 เซนติเมตรขึ้นไป หน่อต้องสะอาดปราศจากโรคและแมลง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541ข)

## 2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผักและผลไม้

ผักและผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยวนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากกระบวนการหายใจซึ่งเป็นการสลาย (catabolic) สารอินทรีย์ที่พืชสะสมไว้ไปเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน พร้อมกับมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา การหายใจจึงทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหารของผลิตผล รวมทั้งพลังงานที่ผู้บริโภคควรจะได้รับ และส่งผลถึงรสชาติที่เปลี่ยนไปของผลิตผล การชะลออัตราการหายใจจึงมีความสำคัญ และเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตผลก่อนถึงมือผู้บริโภค ซึ่งปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการหายใจมีดังนี้

### 2.1 อุณหภูมิ และองค์ประกอบของบรรยากาศ

อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีภายในของผลิตผลทางการเกษตร เมื่ออุณหภูมิของผลิตผลสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็สูงขึ้นตามไปด้วย เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นย่อมกระตุ้นให้สารทุกอย่างมีพลังงานสูงขึ้น ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ก็สามารถเกิดขึ้นได้ใน

อัตราที่สูงขึ้น (จริงแท้, 2546) เช่น การเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งในการทดลองของ Villanueva *et al.* (2005) ที่อุณหภูมิ 2°C สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 10°C ถึง 6 วัน โดยสามารถคงคุณภาพด้านประสาทสัมผัส และ โภชนาการ ได้ดี

ส่วนองค์ประกอบของก๊าซในบรรยากาศที่มีผลต่อการหายใจมากที่สุดคือ ก๊าซออกซิเจน โดยอัตราการหายใจของผลิตผลแปรผันโดยตรงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศรอบ ๆ เช่น อัตราการหายใจของพืชจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศลดลงจนถึงระดับที่ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับพืชใช้ในการหายใจตามปกติ ทำให้พืชเปลี่ยนไปหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดการสร้างและสะสม แอลกอฮอล์ และแอลดีไฮด์ภายในเซลล์พืช ทำให้เกิดลักษณะของสี รสชาติ และกลิ่นเปลี่ยนไป (Kader *et al.*, 1989) ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบ ๆ ตัวผลิตผล จะขัดขวางการดำเนินกระบวนการหายใจ โดยเป็นการชะลออัตราการหายใจ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อวัฏจักร เครบส์ (Krebs cycle) ในช่วงการเปลี่ยนรูปของ succinate เป็น malate และช่วง malate เป็น pyruvate โดยจะมีผลต่อเอนไซม์ succinate dehydrogenase (จริงแท้, 2546)

## 2.2 บรรจุภัณฑ์ และการบรรจุ

ภาชนะบรรจุ หมายถึงวัสดุหรือสิ่งที่ใช้ในการรองรับสินค้าเพื่อการจัดการกับสินค้านั้น หรือเพื่อการขนส่ง หรือเพื่อการวางขาย โดยภาชนะบรรจุสำหรับผักและผลไม้มีหลายชนิดตั้งแต่ แข็ง ะหลอม ไปจนถึงกล่องโฟมหรือตะกร้าพลาสติก ภาชนะบรรจุชนิดใดจะเหมาะสมกับผลิตผลชนิดใดขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจของผลิตผลนั้น ๆ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์พลาสติกมาใช้หีบห่อผลิตผลทางการเกษตรมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกสามารถผลิตเป็นภาชนะบรรจุได้หลายรูปแบบ มีผิวเรียบไม่ทำอันตรายต่อผลิตผล ทนน้ำและความชื้นได้ดี และยังช่วยในการเก็บรักษาผลิตผลในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำ และ/หรือมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าปกติ ส่งผลให้กระบวนการต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของพืชถูกยับยั้ง หรือเกิดช้าลง (Kader *et al.*, 1989)

ในการบรรจุ ปัจจุบันมีการใช้สภาพปรับบรรยากาศ (modified atmosphere) ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตผลอย่างกว้างขวาง โดยการสร้างสภาพปรับบรรยากาศให้กับผลิตผลซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การห่อด้วยฟิล์มพลาสติก การเก็บรักษา

ในถุงพลาสติก และการใช้ไฟหรือสารเคลือบผิว ซึ่งการเลือกใช้ถุงบรรจุควรคำนึงถึงอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และไอน้ำของบรรจุภัณฑ์เป็นหลัก ส่วนการลดอุณหภูมิเพื่อทำการเก็บรักษาผลผลิตจะชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้ เพราะที่อุณหภูมิต่ำลง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านฟิล์มพลาสติกได้น้อยลง ทำให้การหายใจและปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ของพืชลดลง แต่ทั้งนี้การที่ฟิล์มพลาสติกยอมให้ไอน้ำผ่านได้น้อยมาก อาจทำให้เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำภายในถุง ส่งผลให้ผลิตผลเน่าเสีย และมีกลิ่นรสผิดปกติ ดังนั้นจึงต้องเจาะรูให้อากาศถ่ายเทได้ ซึ่งอาจเป็นรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.2 เซนติเมตร (งามทิพย์, 2537; Wiley, 1994)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวหน่อไม้ฝรั่ง ในแง่ของการบรรจุในสภาพปรับบรรยากาศ มีการศึกษาถึงอิทธิพลของระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง โดยวัดค่า % การสูญเสียน้ำหนักสด, ลักษณะสีผิว, ลักษณะภายนอก และค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) พบว่า หน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาในถุง polyethylene (PE) ที่มีระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6% ยังคงรักษาคุณภาพดีที่สุดภายหลังการเก็บเป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 8 – 10°C และมีค่าเฉลี่ย TSS สูงที่สุด ส่วนค่าอื่น ๆ นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (สมชาย, 2542) ส่วนผลของปริมาณก๊าซออกซิเจน และสารดูดซับเอทิลีนต่อคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งเกรดเอ ชนิดหน่อเขียว ในบรรจุภัณฑ์ชนิด PE ผนึกด้วยเครื่องสุญญากาศที่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ในสัดส่วนต่าง ๆ และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 – 6°C พบว่า หน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาใน  $CO_2 : O_2 = 3 : 9\%$  เมื่อยังไม่มีสารดูดซับเอทิลีน จะเก็บรักษาได้นานที่สุด 35 วัน ส่วนหน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาใน  $CO_2 : O_2 = 1.5 : 15\%$  ร่วมกับสารดูดซับเอทิลีน 4 % เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 35 วัน หน่อไม้ฝรั่งยังอยู่ในสภาพยอมรับได้ ดังนั้นจึงไม่ทราบอายุการเก็บรักษาที่แท้จริงของหน่อไม้ฝรั่งที่สภาวะดังกล่าว (สุภารัตน์, 2544) ปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง Villanueva *et al.* (2005) ระบุว่าคือสภาพภายนอกที่ผู้บริโภคมองเห็น และไม่ยอมรับ ได้แก่ ความเต่งตึงของลำต้น (turgidity), รอยเหี่ยวบนตามยาว, ความแห้งของโคน, การเปลี่ยนสี, มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ หรือยอดเน่า และได้ทดลองเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งหน่อเขียวที่ 3 สภาวะ คือ สภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 2°C, สภาวะปรับบรรยากาศแบบ passive ที่อุณหภูมิ 2°C และ สภาวะปรับบรรยากาศโดยเก็บที่อุณหภูมิ 2°C เป็นเวลา 5 วันก่อนจะนำมาเก็บรักษาต่อที่อุณหภูมิ 10°C เพื่อจำลองสถานการณ์การขนส่งในบรรจุภัณฑ์ชนิด oriented polypropylene (OPP) และปล่อยให้เกิดสมดุลของก๊าซเอง พบว่าสภาพปรับบรรยากาศที่อุณหภูมิ 2°C เข้าสู่สมดุลในช่วงเวลา 5 – 9 วัน ที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ประมาณ 15 – 16% และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ประมาณ

6 – 7% และการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่สภาวะแบบปรับบรรยากาศให้ผลดีที่สุด ทั้งในด้านกายภาพ, เคมี, ประสาทสัมผัส และจุลินทรีย์ โดยสามารถยืดอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งได้นานถึง 33 วัน

### 3. การลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักผลไม้ด้วยการล้าง

#### 3.1 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักและผลไม้

การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เช่น *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *E.coli* O157:H7, *Campylobacter jejuni* และ *Listeria monocytogenes* ในผักและผลไม้ มีรายงานว่า แหล่งของการปนเปื้อนเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ในแปลงการเพาะปลูก ระหว่าง หรือหลังการเก็บเกี่ยว ระหว่างกระบวนการผลิต การขนส่ง จนกระทั่งถึงระหว่างการจัดจำหน่าย หรือการเตรียมอาหารในครัวเรือน แหล่งของการปนเปื้อนเหล่านี้ เกิดจากการปนเปื้อนอุจจาระของคนหรือมูลสัตว์ ดินและน้ำสำหรับใช้ในการเกษตรที่มีการจัดการไม่ถูกสุขลักษณะ หรือปนเปื้อนจากน้ำที่ใช้ในระหว่างการผลิตที่ไม่ได้คุณภาพ การปนเปื้อนจากสัตว์พาหะต่าง ๆ รวมทั้งมนุษย์ และการปนเปื้อนข้ามในระหว่างกระบวนการผลิตต่าง ๆ เป็นสาเหตุให้เกิดความเสี่ยงจากจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค (Beuchat, 1996)

*E.coli* จัดอยู่ใน Enterobacteriaceae เป็นแบคทีเรียกลุ่ม โคลิฟอร์ม เคลื่อนที่โดยมีแฟลกเจลลา ชนิดรอบตัว (peritrichous) บางชนิดอาจไม่เคลื่อนที่ สามารถใช้น้ำตาลกลูโคส และแลคโตส สร้างกรด และก๊าซได้ที่อุณหภูมิ 37 และ 44.5°C เป็นแบคทีเรียที่มีถิ่นที่อยู่อาศัยในลำไส้เล็กตอนปลาย และลำไส้ใหญ่ของคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จัดเป็นเชื้อประจำถิ่น (normal flora) ในลำไส้เล็ก ด้วยเหตุนี้การตรวจพบแบคทีเรียชนิดนี้จึงบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนอุจจาระของคนหรือมูลสัตว์ในน้ำและอาหาร สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ไม่ทำให้เกิดโรค (non-pathogenic *E.coli*) และกลุ่มที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic *E.coli*)

การปนเปื้อนของเชื้อ *E.coli* ในอาหาร และผลิตภัณฑ์หลายประเภท รวมถึงผักและผลไม้สดก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคเนื่องจากการบริโภคอาหารในหลายประเทศ ทำให้สูญเสียมูลค่าทางเศรษฐกิจอย่างสูง (FDA, 1999)

## 3.2 การใช้สารฆ่าเชื้อ และกลไกการยับยั้งจุลินทรีย์

### 3.2.1 คลอรีน

การใช้สารประกอบคลอรีนผสมลงในน้ำที่ใช้ล้างผัก ในรูปของเกลือไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 100 – 200 ppm สามารถทำลายแบคทีเรียในน้ำได้อย่างรวดเร็ว โดย U.S. FDA (United States Food and Drug Administration) กำหนดปริมาณการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการล้าง หรือใช้ร่วมกับการปอกเปลือกผัก และผลไม้ด้วยค่าในปริมาณไม่เกิน 0.2% นอกจากนี้ในประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้มีการใช้ไฮโปคลอไรท์ที่มีคลอรีนอิสระไม่เกิน 200 ppm เพื่อเป็นสารทำความสะอาดอุปกรณ์ เครื่องมือ และพื้นผิวสัมผัสอาหารที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร และกำหนดไม่ให้มีสารดังกล่าวตกค้างในผลิตภัณฑ์ (จริงแท้, 2538)

คลอรีนเป็นธาตุตัวหนึ่งในกลุ่มฮาโลเจน (halogen) และอยู่ในรูปของก๊าซ คลอรีนที่มีสีเหลืองแกมเขียว ก๊าซนี้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.48 เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศ มีเลขอะตอมเท่ากับ 17 ค่ามวลอะตอมเท่ากับ 35.457 และค่ามวลโมเลกุลเท่ากับ 70.914 ปัจจุบันได้มีการนำคลอรีนและสารประกอบคลอรีนในรูปแบบต่าง ๆ มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้ในการสุขาภิบาลโรงงาน การล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องมือและอุปกรณ์ การเติมในน้ำที่ใช้ล้างวัตถุดิบ รวมทั้งการผสมในน้ำหล่อเย็นเพื่อล้างกระป๋องที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร คลอรีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ในรูปสารประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อนำมาละลายน้ำจะแตกตัวให้คลอรีนอิสระ ซึ่งจะอยู่ในรูปธาตุคลอรีน ( $Cl_2$ ) กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และไฮโปคลอไรต์ไอออน ( $OCl^-$ ) การแตกตัวให้ธาตุต่าง ๆ นี้ในปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารประกอบคลอรีนแต่ละชนิด

ตารางที่ 1 สารประกอบคลอรีนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ชนิดของสาร	สูตรทางเคมี	คุณสมบัติการละลายน้ำ ที่อุณหภูมิ 21°C
Gaseous chlorine	$Cl_2$	0.7%
Hypochlorous acid	HOCl	ละลายได้ดีมาก
Calcium hypochlorite	$Ca(OCl)_2$	ละลายได้ดีปานกลาง

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของสาร	สูตรทางเคมี	คุณสมบัติการละลายน้ำ ที่อุณหภูมิ 21°C
Dichlorodiethyl – hydantoin	$C_3H_6Cl_2N_2O_2$	1.2%
Trichlorocyanuric acid	$Cl_3(NCO)_3$	1.2%
Dichlorocyanuric acid	$Cl_2H(NCO)_3$	2.6%
Chlorine dioxide	$ClO_2$	200 cm <sup>3</sup> / 100 ml

ที่มา: คัดแปลงจาก Cords and Dychdala (1993)

ในการนำคลอรีนมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้น นิยมใช้ในรูปแบบของแก๊สคลอรีน, เกลือโซเดียม หรือแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (sodium หรือ calcium hypochlorite: NaOCl หรือ Ca(OCl<sub>2</sub>)) และคลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide) โดยส่วนใหญ่สารประกอบคลอรีนเหล่านี้จะแตกตัวให้คลอรีนอิสระในน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปของคลอรีน (Cl<sub>2</sub>), กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCl<sup>-</sup>) โดยที่ระดับความเป็นกรด-ด่างคือ 4 – 5 คลอรีนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ HOCl ส่วนที่ความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 4 คลอรีนจะอยู่ในรูป Cl<sub>2</sub> มากขึ้น และถ้าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 คลอรีนจะอยู่ในรูปของ OCl<sup>-</sup> มากขึ้น (Cords and Dychdala, 1993)

ไฮโปคลอไรท์เป็นเกลือโซเดียมหรือแคลเซียมของกรด hypochlorous เมื่ออยู่ในสารละลาย เกลื่อนี้จะแตกตัวออกให้ OCl<sup>-</sup> ซึ่งเป็นอนุมูลที่มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ได้ดี เกลือไฮโปคลอไรท์ที่ใช้กันมากได้แก่ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ มักจะขายในรูปแบบของเหลว ซึ่งมีคลอรีนอิสระอยู่ประมาณ 10 – 14 % และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งอยู่ในรูปผง มีคลอรีนอิสระอยู่ประมาณ 30 % ใช้ในการทำมาสะอาดแบบ clean – in – place (CIP) ประสิทธิภาพของสารเหล่านี้จะดีที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่าง 4 – 5 และมีการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่าง 5 ฉะนั้นเวลาใช้ จึงมักเตรียมสารนี้ให้มีความเป็นกรด-ด่างสูงคือ 10 – 11 และควบคุมอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มการกัดกร่อน โดยทั่วไปจะใช้เวลาความเข้มข้นประมาณ 50 – 200 ppm ของคลอรีนอิสระ และให้เวลาสัมผัสตั้งแต่ 3 – 30 นาที การลดปริมาณความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ลงจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ (ศิวาพร, 2536)

การทำลายจุลินทรีย์ของคลอรีนและสารประกอบคลอรีน เกิดจากการที่สารประกอบชนิดนี้ สามารถแตกตัวให้กรดไฮโปคลอรัส ซึ่งมีคุณสมบัติทำลายจุลินทรีย์ โดยกลไกในการทำลายจุลินทรีย์ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่พออธิบายได้ว่ากรดไฮโปคลอรัสเข้าไปยับยั้งเซลล์ของจุลินทรีย์ใน 3 ตำแหน่ง (Campers and MacFeters, 1979) ได้แก่

1. ตำแหน่งที่เป็นเยื่อหุ้มเซลล์ ได้แก่ ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ หรือเยื่อหุ้มสปอร์ โดยคลอรีนทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ให้เสียสภาพ ทำให้ไม่สามารถรับสารอาหารเข้าสู่เซลล์ การเจริญของจุลินทรีย์จึงหยุดและตายในที่สุด
2. ตำแหน่งที่เป็นของเหลวภายในเซลล์ (protoplasm) พบว่า คลอรีนจะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับส่วน protoplasm ของเซลล์ โดยจะไปตกตะกอนส่วนที่เป็นโปรตีนของเซลล์ ทำให้ protoplasm ไม่สามารถทำงานได้
3. ตำแหน่งที่เป็นเอนไซม์ คลอรีนรบกวนการทำงานของเอนไซม์ และยังสามารถทำลายเอนไซม์ได้อีกด้วย โดยคลอรีนเข้าไปในเซลล์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือเกิดการรวมตัวกันของเอนไซม์ ทำให้ระบบการทำงานของเอนไซม์เสียไป

### 3.2.2 โอโซน

โอโซนเป็นก๊าซสีน้ำเงิน มีกลิ่นฉุน น้ำหนักโมเลกุล 48 จุดเดือด 111.9 °C จุดหลอมเหลว -192.7 °C ค่า oxidation potential สูง -2.07 V ความสามารถในการละลายน้ำค่อนข้างจำกัดที่ 20 °C โอโซนสามารถละลายน้ำได้เพียง 570 mg/l (สิวาพร, 2542) เมื่อโอโซนในน้ำสลายตัวเกิดอนุมูลอิสระคือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (HO<sub>2</sub>) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) และซูเปอร์ออกไซด์ (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สูงมาก สามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น กลีของโลหะ สารประกอบอินทรีย์ ไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ในน้ำ (Kim *et al.*, 1999)

โอโซนสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น *Escherichia coli*, *E. coli* O157:H7, *Pseudomonas fluorescens*, *Salmonella Typhimurium*, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* รวมทั้งยีสต์ และสปอร์เชื้อรา เช่น *Aspergillus niger* โดยกลไกในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนอาจเกิดขึ้นได้สองลักษณะ (Moore *et al.*, 2000) คือ

1. โมเลกุลของไอโซนเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารเคมีที่อยู่ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์
2. อนุมูลอิสระ (free radical – mediated) เป็นตัวเข้าทำลาย glycoprotein ที่เชื่อมหุ้มเซลล์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียสูญเสียคุณสมบัติการยอมให้สารบางอย่างผ่านเข้าออกได้ มีผลทำให้เซลล์แตก

ไอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตอาหารที่มีความปลอดภัยกว่าสารอื่น จัดเป็น generally recognized as safe (GRAS) เนื่องจากเป็นสารต้านจุลินทรีย์ชนิดรุนแรง มีอำนาจทะลุทะลวงสูง เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เพราะมีค่า oxidation potential สูง ช่วยลดเวลาในการสัมผัสกับพื้นผิว มีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 20 นาที สลายตัวง่าย ให้อะตอมของออกซิเจน ไม่มีลักษณะเป็นสารก่อมะเร็งหรือสารก่อกลายพันธุ์ (Kim, 1999; Xu, 1999) พบว่า มีการใช้น้ำไอโซนเพื่อลดการปนเปื้อนในผักผลไม้ เนื้อแกะ และสัตว์ปีก น้ำไอโซนมีประสิทธิภาพทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคทางเดินอาหาร (Moore *et al.*, 2000)

### 3.3 ความสำคัญของการล้างผักสดเพื่อลดปริมาณเชื้อปนเปื้อน

เกษตรอินทรีย์เป็นหนึ่งในนโยบายของรัฐบาลในการปรับทิศทางการผลิตในภาคการเกษตรใหม่ให้สอดคล้องกับสถานการณ์โลก โดยไทยมีโอกาสนในการที่จะหันไปผลิตสินค้าเกษตรอินทรีย์ทั้งเพื่อป้อนตลาดในประเทศ และตลาดส่งออก เนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภคนิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ ทำให้เริ่มหันมาสนใจบริโภคอาหารที่ผลิตโดยปราศจากสารเคมีตกค้าง และการผลิตนั้นเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการไม่ใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิต ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเกษตรอินทรีย์ และไทยก็เป็นประเทศที่ส่งออกสินค้าอาหารที่สำคัญของโลก ปัจจุบันทั้งรัฐบาลและเอกชนดำเนินการเพื่อสนับสนุนการผลิตสินค้าเกษตรอินทรีย์หลากหลายประเภทเป็นการนำร่อง ไม่ว่าจะเป็นข้าว พืชผัก ผลไม้ เครื่องเทศและสมุนไพร โดยเฉพาะหน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดฝักอ่อน ข้าวโพดหวาน รวมทั้งผักในตระกูลสลัดทั้งหมดล้วนแต่เป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ซึ่งในการเตรียมผักหรือผลไม้สด ที่ผ่านการคัดเลือกคุณภาพ มีความอ่อนแอกว่าที่เหมาะสมในการบริโภค มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก เจาะแกนตัดแต่งคำหั่น หั่นให้เป็นชิ้นและบรรจุ ถือเป็นกระบวนการแปรรูปขั้นต่ำ (minimally processed) หรือเรียกว่า ผักและผลไม้ตัดแต่ง ที่เป็นผลิตภัณฑ์บรรจุพร้อมบริโภค อย่างไรก็ตามผักและผลไม้ตัดแต่งยังเป็นเนื้อเยื่อที่มีชีวิต ซึ่งยังคงกิจกรรมการมีชีวิตหรือมีปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในเซลล์เกิดขึ้นตลอดเวลา

ประกอบกับการตัดแต่งยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในทางเสื่อมคุณภาพมากกว่าผักผลไม้สด โดยการแปรรูปชิ้นตำผักและผลไม้สดทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบอบบาง ง่ายต่อการเข้าทำลายของเชื้อโรคและเน่าเสียได้เร็วกว่าปกติ ซึ่งตรงกันข้ามกับการแปรรูปชนิดอื่น ๆ เช่น การตากแห้ง การบรรจุกระป๋อง หรือการแช่แข็ง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ล้วนทำให้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการแปรรูปชิ้นตำผักและผลไม้สดมีข้อดีที่สามารถรักษาคุณภาพไว้ใกล้เคียงกับผักและผลไม้สดมากกว่าการแปรรูปอื่น ๆ (จริงแท้, 2538)

ผักสดที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป มีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ตามธรรมชาติมากกว่า  $10^6$  colony forming unit/gram (CFU/g) และพบเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรครวมอยู่ด้วย (Parish *et al.*, 2003) การล้างจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการลดปริมาณเชื้อดังกล่าว เพื่อให้มีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น การล้างทำความสะอาดหน่อไม้ฝรั่งพันธุ์ยูนิเวอร์ซิตีออฟแคลิฟอร์เนีย เบอร์ 309 (UC 309) เกรดปีตุม ชนิดหน่อเขียว จากแหล่งปลูกที่ อ.บางเลน จ.นครปฐม โดยนำโคนหน่อมาแช่ด้วยน้ำประปา และน้ำผสมคลอรีน และศึกษาความแตกต่างของปริมาณเส้นใย และการเน่าเสียระหว่างการบรรจุเปียก โดยการใช้ฟองน้ำชุบน้ำรองกันกล่องกระดาษ และการบรรจุแห้ง โดยไม่ใช้ฟองน้ำ ผลการวิจัยพบว่า การแช่โคนหน่อในน้ำประปา และน้ำผสมคลอรีน ไม่ได้ทำให้ปริมาณเส้นใยในหน่อไม้ฝรั่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่การใช้น้ำผสมคลอรีนที่ความเข้มข้น 400 ppm ช่วยลดการเน่าเสียเนื่องจากโรคเน่าและที่เกิดจากเชื้อ *Erwinia carotovora* ได้อย่างมาก ส่วนการบรรจุเปียก และการบรรจุแห้งไม่ได้ทำให้หน่อไม้ฝรั่งมีการเน่าเสียแตกต่างกัน แต่การบรรจุเปียกทำให้หน่อไม้ฝรั่งสามารถรักษาความสดได้นานกว่า (เย็นจิตต์, 2535) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลการล้างหน่อไม้ฝรั่งหน่อขาว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) เข้มข้น 100 ppm เปรียบเทียบกับน้ำประปา ที่มีต่อคุณภาพทางด้านเคมี ด้านประสาทสัมผัส และด้านจุลชีววิทยาของหน่อไม้ฝรั่ง ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 15 วัน พบว่า การล้างหน่อไม้ฝรั่งหน่อขาวด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ จะทำให้จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ชนิด mesophiles และ psychrophiles ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษามีน้อยกว่า การล้างด้วยน้ำประปา ประมาณ 2 log CFU/g ส่วนคุณภาพด้านอื่น ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Simon *et al.*, 2004)

นอกจากนี้ยังมีการล้างโดยใช้สารละลายโอโซน ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อ เช่น การล้างผักกาดหอม (iceberg lettuce) ที่มีการเพาะเชื้อ Aerobic plate count (APC) และ Psychrotrophic plate counts (PPC) จำนวนชนิดละ 8.0 log CFU/g ลงไป ด้วยสารละลายโอโซน, สารละลายคลอรีน และสารละลายโอโซนร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วตรวจสอบ

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ พบว่า การใช้สารละลายไอโซนร่วมกับคลอรีน ในอัตราส่วน 7.5: 150 mg/l ช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองชนิดได้ดีกว่าการใช้สารละลายไอโซน หรือสารละลายคลอรีนเพียงอย่างเดียว โดยลดลงไปถึง 1.4 log CFU/g และยังรักษาความใสของน้ำในกระบวนการผลิตให้คงไว้ได้นานด้วย ส่วนด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ เนื้อสัมผัส และความสมบูรณ์ของใบ ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภคกลุ่มตัวอย่าง พบว่าผู้บริโภคเลือกผักกาดหอมที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายไอโซนร่วมกับคลอรีนถึง 64.5% แม้จะเก็บไว้แล้ว 25 วัน ซึ่งมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับผักกาดหอมที่ล้างด้วยสารละลายไอโซน หรือสารละลายคลอรีนเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากสารละลายคลอรีนก่อให้เกิดสารประกอบ trihalomethane ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และกระบวนการผลิตจริงในอุตสาหกรรมมีการใช้คลอรีนในปริมาณที่มาก เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกให้หมด หากมีการใช้ไอโซนเป็นสารประกอบร่วมจะช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนได้ และควรมีการศึกษาวิจัยถึงผลของปริมาณ ไอโซนต่อกลิ่นรสของผักสดด้วย (Garcia *et al.*, 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการล้างผักกาดหอมโดยใช้สารละลายไอโซน, สารละลายคลอรีน และน้ำประปา ต่อคุณภาพด้านประสาทสัมผัส และจุลชีววิทยาในระหว่างการเก็บรักษาในถุง oriented polypropylene (OPP) ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 9 วัน โดยทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง ในส่วนของการล้างหัวผักกาดเบื้องต้น (pre-washing) และตามด้วยการล้างใบผักกาดที่หั่นแล้ว (washing process) พบว่า การใช้สารละลายคลอรีนในส่วนของการล้างหัวผักกาดให้ผลดีในด้านคุณภาพทางจุลชีววิทยา คือสามารถลดปริมาณเชื้อเริ่มต้น ได้แก่ aerobic mesophiles, pseudomonades และ *Enterobacteriaceae* ลงได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายไอโซน หรือน้ำประปา และจากผลทางด้านประสาทสัมผัส หลังจากขั้นตอนการล้างใบผักกาดที่หั่นแล้ว พบว่า การใช้สารละลายคลอรีนยังลดการเกิดสีน้ำตาลในใบผักกาด, ชะลอการเสื่อมเสียในด้านคุณภาพที่มองเห็นโดยรวม และผู้ทดสอบยังไม่สามารถรับรู้ถึงกลิ่นรสที่ไม่ดี หรือผิดปกติอันเนื่องมาจากการใช้คลอรีนอีกด้วย แต่การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไอโซนเพียง 1 mg/l ในขณะที่ใช้สารละลายคลอรีนเข้มข้น 100 และ 200 mg/l ดังนั้น การใช้ไอโซนอย่างมีประสิทธิภาพมีความจำเป็นต่อการวิจัยต่อไป (Baur *et al.*, 2004)

#### 4. การยืดอายุการเก็บรักษาผักสดในสภาพปรับบรรยากาศ

การเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรให้มีอายุมากขึ้นต้องเริ่มจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีตั้งแต่เก็บเกี่ยว ผักเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง ซึ่งกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ยังคงเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา หลังจากการเก็บเกี่ยว เช่น การหายใจ การคายน้ำ การสุก และการเข้าทำลายของจุลินทรีย์และแมลง ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตผลให้มีอายุได้นาน จึงมีวิธีการปฏิบัติต่าง ๆ เพื่อชะลอเมแทบอลิซึม และ

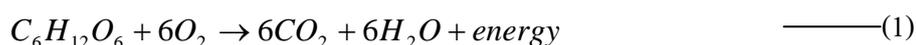
ชะลอการเจริญของจุลินทรีย์ดังกล่าว ได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ องค์ประกอบของบรรยากาศ และปัจจัยอื่น ๆ นอกจากนี้ยังต้องมีกรรมวิธีการลดปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนมากับผลิตภัณฑ์ภายหลังการเก็บเกี่ยวด้วย (จริงแท้, 2546)

วิธีการเก็บรักษาผลิตผลเพื่อควบคุมกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวให้เกิดช้าลง และยืดอายุการเก็บรักษา มีหลายวิธี เช่น

1. การใช้อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิต่ำทำให้อัตราการหายใจ และกระบวนการเมแทบอลิซึมลดลง การผลิตเอทิลีน และการตอบสนองของเนื้อเยื่อพืชต่อเอทิลีนลดลง ยังรวมไปถึงลดการเจริญและการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ โดยพืชแต่ละชนิดมีความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำได้ไม่เท่ากัน การใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาจึงต้องเหมาะสมกับชนิดของพืชที่ทำการเก็บรักษา โดยเฉพาะพืชผลในเขตร้อนหรือกึ่งร้อน มักเกิดความเสียหาย หรืออาการผิดปกติทางสรีรวิทยาที่เรียกว่า chilling injury (CI) ขึ้นได้ (Kader *et al.*, 1989; อรษา, 2536)

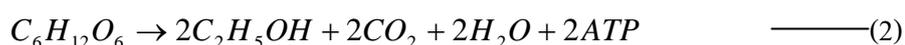
2. การเก็บรักษาในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำ และ/หรือมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าปกติ เช่น การใช้สภาพปรับบรรยากาศ (modified atmosphere, MA) หรือการควบคุมสภาพบรรยากาศ (controlled atmosphere, CA) ซึ่งต้องทำควบคู่ไปกับการใช้อุณหภูมิต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมจึงจะได้ผลดี (Powrie and Skura, 1991) ในสภาพที่มีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำ และ/หรือมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าปกติ กระบวนการต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของพืชจะถูกยับยั้ง หรือเกิดช้าลง (Kader *et al.*, 1989) ได้แก่

2.1 การยับยั้งอัตราการหายใจ กระบวนการหายใจของพืชเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอาหารที่สะสมภายในเซลล์เพื่อสร้างพลังงานที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ดังสมการที่ (1)



น้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งจะถูกออกซิไดซ์ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ซึ่งพลังงานส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในกระบวนการชีวเคมีของพืช ส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อน นอกจากนี้ยังได้สารประกอบที่ให้กลิ่นรสเฉพาะตัวของผักและผลไม้สดออกมาด้วย

อัตราการหายใจของพืชแปรผันโดยตรงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศรอบ ๆ พืช พบว่า อัตราการหายใจของพืชจะลดลงเมื่อความดันของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศลดลงจนถึงระดับที่ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอให้พืชใช้หายใจตามปกติ พืชจะเปลี่ยนไปหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดการสร้างและสะสมแอลกอฮอล์ และแอลดีไฮด์ภายในเซลล์พืช ทำให้เกิดลักษณะของสี รสชาติ และกลิ่นเปลี่ยนไป ดังสมการที่ (2)



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะลออัตราการหายใจของพืชได้เช่นกัน แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกิน 20% จะทำให้เอนไซม์ในวัฏจักรเครบส์ (Krebs' cycle) ทำงานผิดปกติ มีผลให้การหายใจเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Kader, 1992) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ด้วย

2.2 ชะลอการสังเคราะห์เอทิลีน เอทิลีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่พืชสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุก และการเสื่อมเน่าเสียของผักและผลไม้ ความเข้มข้นของเอทิลีนเพียง 0.1 ppm ที่สะสมในระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สด สามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เร่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด ทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง เร่งความสุก เร่งการสูญเสียคลอโรฟิลล์ของพืช เร่งการร่วงของใบ และทำให้เกิดความผิดปกติทางสรีรวิทยาและการเน่าเสียในที่สุด (จริงแท้, 2546) โดยการสังเคราะห์ และการทำงานของเอทิลีนขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ อัตราการสังเคราะห์เอทิลีนของพืชลดลงเมื่อมีก๊าซออกซิเจนน้อยกว่า 8% โดยอัตราการสังเคราะห์เอทิลีนลดลงถึง 50% เมื่อมีก๊าซออกซิเจน 2.5% (Zagory and Kader, 1988)

2.3 ชะลอการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส เมื่อชะลออัตราการหายใจ และการสังเคราะห์เอทิลีนลง ซึ่งเป็นการช่วยชะลอการสุกของผักผลไม้ ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผักผลไม้อ่อนนุ่มช้าลง

2.4 ชะลอการสูญเสียคลอโรฟิลล์ หรือเกิดสีเหลือง สภาพปรับบรรยากาศช่วยลดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ และลดการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานิน

2.5 ชะลอการสูญเสียกรด และการเกิดกลิ่น เนื่องจากการสะสมของแอลกอฮอล์ และแอลดีไฮด์ที่ได้จากกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สภาวะที่เหมาะสมที่แนะนำให้ใช้ในการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งในสภาพปรับบรรยากาศ คือ ที่อุณหภูมิ 0 – 5 °C โดยมีปริมาณก๊าซออกซิเจนเท่ากับบรรยากาศปกติ (21%) และปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 5 – 10% (Powrie and Skura, 1991) ส่วนผลของชนิดของฟิล์ม และความเข้มข้นของก๊าซที่เหมาะสมในการใช้บรรจุต่อคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งยังมีข้อมูลค่อนข้างน้อย มีเพียงข้อเสนอแนะว่า ฟิล์มที่มีอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซสูง (ออกซิเจน และคาร์บอน ไดออกไซด์) ได้แก่ LDPE และ OPP จะเหมาะสมกับการบรรจุผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูง อย่างเช่น หน่อไม้ฝรั่ง (Yam and Lee, 1995) นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลของการใช้ฟิล์ม OPP และ cellophane (biodegradable film) ซึ่งเป็นฟิล์มที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ บรรจุหน่อไม้ฝรั่งหน่อขาว เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหน่อไม้ฝรั่งที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2, 10 และ 20°C เป็นเวลา 4 วัน พบว่า ฟิล์ม OPP เข้าสู่สมดุลด้วยเวลา 18 ชม. ที่ความเข้มข้นของ  $CO_2 : O_2 = 3 : 15$  % และช่วยชะลอการเสื่อมเสียของหน่อไม้ฝรั่งได้ดีที่อุณหภูมิ 2°C คือ ชะลอการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลไปเป็นกรด และการเปลี่ยนแปลงทางเนื้อสัมผัส (texture) นอกจากนี้ ยังป้องกันการสูญเสียน้ำได้ดีกว่า cellophane (Kadau *et al.*, 2003)

อายุการเก็บรักษาของผักผลไม้สด ขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจ, อัตราการคายน้ำ และสภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษา โดยผักผลไม้แต่ละชนิดมีปัจจัยที่เหมาะสมในการเก็บรักษาแตกต่างกัน Brash *et al.* (1995) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจ กับอายุการเก็บรักษาที่เหลือ (residual shelf-life) ของหน่อไม้ฝรั่ง โดยนำหน่อไม้ฝรั่งคัดเกรด เลือกหน่อที่ตรง ไม่มีรอยเน่าเสีย มาลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำเย็น (hydrocooled) แช่คลอรีนเข้มข้น 200 ppm 15 นาที แล้วเก็บในถุง perforated polyethylene ที่อุณหภูมิ 0 – 20°C แล้ววัดอัตราการหายใจเป็นช่วง ๆ จนครบ 105 ชม. นำออกมาไว้ที่อุณหภูมิ 20°C เพื่อดูอายุการเก็บที่เหลือ ซึ่งเป็นตัวแทนของการวางขายปลีกจริง พบว่า อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ลดลง เมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งในการทดลองสามารถเก็บไว้ได้นาน 5 วัน นอกจากนี้ Garcia-Gimeno *et al.* (1998) ได้ศึกษาอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง โดยวัดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เน่าเสีย คือ lactic acid bacteria และ psychotropic bacteria ในระยะเวลาการเก็บรักษา 22 วัน ที่อุณหภูมิ 2 – 20°C พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์, ก๊าซออกซิเจน และ pH พบว่า psychotropic bacteria มีผลโดยตรงต่อการเน่าเสียของหน่อไม้ฝรั่งที่บรรจุใน P-Plus film ซึ่งเมื่อสร้างแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันกับการทดลองวัดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย และจากการตรวจสอบทางประสาทสัมผัส

## 5. ทฤษฎีและสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บรักษา (shelf life) หมายถึง ระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์เก็บรักษา ณ สถานะหนึ่งแล้ว ยังมีคุณภาพเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคอยู่ ทั้งคุณภาพด้านประสาทสัมผัส, เคมี, กายภาพ และชีวภาพ (Man, 2002) สำหรับอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สดนั้นค่อนข้างสั้น เนื่องจากผักและผลไม้สดยังมีชีวิตอยู่แม้จะเก็บเกี่ยวมาจากดินแล้ว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของผักและผลไม้ โดยเฉพาะอาหารสะสมที่ได้จากการสังเคราะห์แสง เช่น น้ำตาล, แป้ง และไขมัน จะถูกใช้ไปในการหายใจของผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้คุณภาพลดลง ผลผลิตก็จะเน่าเสีย ถ้าอาหารที่สะสมในผลิตผลถูกใช้หมดไป

### 5.1 จลนพลศาสตร์เคมี (chemical kinetics)

โดยทั่วไปอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารตัดสินจากอัตราการเสื่อมเสียคุณค่าทางอาหาร, สี, กลิ่นรส, เนื้อสัมผัส และอื่น ๆ ซึ่งเกิดจากอัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านเคมี, ชีวเคมี และจุลชีววิทยา ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายใน และปัจจัยภายนอก แต่ส่วนใหญ่คุณภาพที่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคต่ำลงเนื่องมาจากปัจจัยภายในโดยตรง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีระหว่างการเก็บรักษาที่สามารถให้หลักจลนพลศาสตร์เคมี เพื่อติดตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่เราสนใจเทียบกับเวลาเป็นตัวอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และสีของผลิตภัณฑ์ (Villota and Hawkes, 1992) ทั้งนี้ปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้การสูญเสียคุณภาพเกิดขึ้นมักจะเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาจลนศาสตร์ลำดับที่หนึ่ง (first-order kinetics) อธิบายได้ตามสมการ

$$\frac{dA}{dt} = kA \quad \text{—————(3)}$$

เมื่อ  $A$  = ตัวบ่งชี้ด้านคุณภาพที่ต้องการวัดค่า

$t$  = เวลา

$k$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate constant)

อินทิเกรตสมการ (3) จะได้

$$\ln \left[ \frac{A}{A_0} \right] = kt \quad \text{—————(4)}$$

จากสมการที่ (4) พบว่าหากพล็อตกราฟระหว่าง  $\ln[A/A_0]$  กับ  $t$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $k$  และเมื่อทำการพล็อตค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ( $T$ ) จะได้ค่า  $k$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ซึ่งสมการทั้ง zero- และ first-order จะมีความสัมพันธ์ ดังนี้ (Robertson, 1993)

$$k_1 t_{s1} = k_2 t_{s2} \quad \text{—————(5)}$$

เมื่อ  $k_1$  = rate constant at  $T_1$ ,  $k_2$  = rate constant at  $T_2$ ,  $t_{s1}$  = อายุการเก็บ (shelf life) ที่  $T_1$  และ  $t_{s2}$  = อายุการเก็บ (shelf life) ที่  $T_2$

## 5.2 Arrhenius Equation

อัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยังได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาโดยตรง ซึ่งในปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลของสารในการเข้าทำปฏิกิริยากัน เกิดการชนกันต่อหน่วยเวลามากขึ้น ซึ่งทฤษฎีที่ใช้อธิบายผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยา คือ The Collision theory และ The Arrhenius equation โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และ activation energy ( $E_a$ ) เป็นไปตาม Arrhenius equation ดังสมการที่ (6)

$$k = k_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad \text{—————(6)}$$

$k_0$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิอ้างอิง, (หน่วยของเวลา เช่น ชั่วโมง, วัน)

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol K),

$T$  = อุณหภูมิ (K)

นอกจากนี้ ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยายังเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากตามทฤษฎีจลนพลศาสตร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น การชนกันต่อหนึ่งหน่วยเวลามีโอกาสมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิเป็นไปตามสมการที่ (6) ซึ่งทั้งสมการที่ (5) และ (6) สามารถใช้ทำนายอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเดียวกันที่อุณหภูมิอื่นว่าจะเกิดขึ้นเร็วหรือช้า รวมถึงสามารถทำนายอายุการเก็บรักษาที่สภาวะเร่ง (accelerated shelf life test) โดยทำการทดลองเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่า แล้ว Extrapolate มาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อหา

อายุการเก็บ สำหรับในการทดลองนี้ใช้การวัดปริมาณเส้นใย และสีเทียบกับการสังเกตลักษณะภายนอกโดยผู้ทำการทดลองเอง ได้แก่ ความสดของหน่อ และกลิ่นผิดปกติ ตามรายละเอียดในส่วนอุปกรณ์และวิธีการ โดยกำหนดให้ลักษณะภายนอกที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคคือที่ระดับคะแนนต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 ซึ่งถือว่าสิ้นสุดอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง

เมื่อเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งในสภาพปรับบรรยากาศที่อุณหภูมิ 10, 15 และ 25°C แล้วนำข้อมูลด้านคุณภาพมาพล็อตกราฟเทียบกับเวลาการเก็บรักษาจะได้ค่าความชื้นเป็นค่า  $k$  ที่แต่ละอุณหภูมิ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งที่ได้จากการวิเคราะห์ทางกายภาพกับค่าจากการสังเกตลักษณะภายนอกเพื่อใช้ตัดสินอายุการเก็บรักษา จากนั้นนำค่า  $\ln(k)$  มา plot กับ  $1/T$  (°K) หรือที่เรียกว่า Arrhenius plot จะได้ค่าความชื้นเป็นค่า Activation energy ( $E_a$ ) จากสมการที่ (6) จะได้

$$\log k = \log k_0 - \frac{E_a}{2.3RT} \quad \text{————(7)}$$

และ

$$\log\left(\frac{t_{s1}}{t_{s2}}\right) = \frac{E_a}{2.3R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad \text{————(8)}$$

จากสมการที่ (8) เมื่อพล็อตค่าระหว่างค่า  $\log(t_{s1}/t_{s2})$  กับ  $\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$  จะได้สมการเส้นตรงสามารถใช้ทำนายอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้

มีการนำหลักการของจลนศาสตร์ของเอนไซม์มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายอัตราการหายใจ ร่วมกับ Arrhenius equations โดย Hertog *et al.* (1998) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายอัตราการหายใจ และการหมัก ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซ (ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์) ที่สภาวะการเก็บรักษา โดยการสมมติให้อัตราการหายใจ และการหมักเป็นปฏิกิริยาขั้นตอนเดียว และมีตัวยับยั้งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเอง คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออธิบายระบบด้วยสมการของ Michaelis-Menten ชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (competitive inhibitor) ร่วมกับชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (uncompetitive inhibitor) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงกับแอปเปิ้ล, chicory (พืชยุโรปที่ใบมีรสขมใช้เป็นผักสลัด) และมะเขือเทศ เช่นเดียวกับ Uchino *et al.* (2004) ที่เสนอแบบจำลองทำนายอัตราการหายใจของผักผลไม้สด ที่แปรตามเวลา และอุณหภูมิในขณะทำการขนส่ง, การวางขายปลีก และการเก็บรักษา โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก วัด

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการหายใจตามเวลาที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ขั้นตอนที่สอง หาค่าคงที่ของปฏิกิริยาจาก Arrhenius plot ที่อุณหภูมิ 10 – 40°C แล้วทดสอบแบบจำลองกับมะเขือม่วง, หน่อไม้ฝรั่ง และบรอกโคลี พบว่าให้ผลสอดคล้องกับการทำนายของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ส่วน Raghavan *et al.* (1999) ศึกษาอัตราการหายใจของบรอกโคลี ที่เก็บรักษาในสัดส่วนความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ ในสภาพปรับบรรยากาศที่อุณหภูมิ 3 – 24°C พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองเช่นกัน โดยยังพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลต่ออัตราการหายใจน้อยมาก

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ทำนายความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบปรับบรรยากาศ โดยใช้หลักของสมดุลมวลสารสร้างสมการประกอบด้วยพจน์การแพร่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แบบฟิกเกียน และพจน์อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด โดยทดสอบแบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบ พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจแบบ Michaelis-Menten ชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (uncompetitive inhibitor) หรือชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (noncompetitive inhibitor) สามารถทำนายผลใกล้เคียงกับการทดลองที่รวบรวมจากงานวิจัยอื่น มากกว่าแบบจำลองอื่น ๆ (ประพาพรัตน์, 2540) นอกจากนี้ ประพาพรัตน์ (2540) ยังมีการศึกษาผลของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A) ความหนาของพอลิเมอร์ฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ (L) ค่าการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์ (Po, Pc) น้ำหนักของผักและผลไม้สด (W) ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V) และความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซทั้งสองชนิดในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพบว่าตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์ (%O<sub>2(eq)</sub>, %CO<sub>2(eq)</sub>) และเวลาเข้าสู่สมดุล (t<sub>eq</sub>) แต่ในงานวิจัยนี้ ไม่ได้มีผลสรุปเรื่องความเข้มข้นของก๊าซที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการเก็บ ต่อมามีการพัฒนา โปรแกรม MAP 2000 ที่ถูกเขียนขึ้นจากโปรแกรม Microsoft Visual Basic โดยใช้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บนพื้นฐานเดียวกับของประพาพรัตน์ (2540) พบว่า สามารถคำนวณค่าความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ณ เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้รวบรวมจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา นอกจากนี้ยังได้แสดงแนวทางการคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของ P<sub>O<sub>2</sub></sub> \* A/dW และ P<sub>CO<sub>2</sub></sub> \* A/dW ของบรรจุภัณฑ์แบบปรับบรรยากาศสำหรับบรอกโคลี และกะหล่ำปลีด้วย (ยิ่งศักดิ์, 2543)

ส่วนการพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจและการคายน้ำ เพื่อใช้ทำนายส่วนประกอบของก๊าซ (ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์), ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์ โดยใช้

หลักการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร รวมทั้งพฤติกรรมทางกายภาพของระบบบรรจุภัณฑ์แบบปรับบรรยากาศของการบรรจุตู้เบอรี่ที่อุณหภูมิ 15 และ 20 °C ในพลาสติกฟิล์มชนิด LDPE ที่มีส่วนผสมของ zeolite 5% และ LDPE ที่มีส่วนผสมของ starch 10% พบว่าให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดลองมาก (Song *et al.*, 2002) ในด้านแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยว หรืออายุการเก็บรักษาของผักผลไม้สดนั้น Lukasse and Polderdijk (2003) ได้เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทำนายคุณภาพของเห็ดสด ในด้านการเปลี่ยนสี, ความยาวก้าน และความบานของดอกเห็ด ที่แปรตามอุณหภูมิ โดยให้การให้คะแนนของผู้บริโภคเป็นการตัดสินใจยอมรับคุณภาพ พบว่า สามารถหาค่าคงที่ของสมการในแต่ละแบบจำลองได้ แต่ไม่มีการรวมเป็นแบบจำลองเดียว จึงไม่สามารถทำนายอายุการเก็บรักษาโดยรวมของเห็ดสดได้