บทที่ 6

เทคโนโลยีเฮอร์เดิล

(Hurdle Technology)

บทนำ

แนวคิดของการใช้เฮอร์เดิลซึ่งเป็นการนำปัจจัยหรือวิธีการต่างๆ มาใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มความคงตัว (stability) ความปลอดภัยและคุณภาพของอาหาร เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและยังสามารถคงคุณลักษณะที่ดีทางประสาทสัมผัสไว้ได้ แนวคิดนี้เริ่มต้นมาจากนักจุลชีววิทยาทางอาหาร Lothar Leistner ซึ่งเป็นผู้ตั้งชื่อเทคโนโลยีเฮอร์เดิล (hurdle technology) เป็นคนแรกหลังจากเกษียณตนเองจากสถาบันวิจัยเนื้อสัตว์แห่งประเทศเยอรมัน (the German Meat Research Institute) โดยได้เผยแพร่แนวคิดดังกล่าว เพื่อประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารทั้งในประเทศอุตสาหกรรมและประเทศที่กำลังพัฒนา และนักวิจัยอีกท่านหนึ่งที่มีบทบาทอย่างมากเกี่ยวกับเทคโนโลยีเฮอร์เดิล ได้แก่ Graham W. Gould ซึ่งได้อธิบายหลักการของเฮอร์เดิลโดยใช้เหตุผลทางวิทยาศาสตร์ ที่ทำให้การใช้เทคนิคหรือวิธีการต่างๆ ร่วมกันในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสามารถนำมาใช้อย่างได้ผล โดยได้อธิบายเกี่ยวกับโฮมีโอสเตซิส (homeostasis) ปฏิกิริยาความเครียด (stress reactions) การตอบสนองในระยะคงที่ (stationary phase response) และการอ่อนแรงของเมตาโบลิซึม (metabolic exhaustion) ซึ่งมีผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยการใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิล

เทคโนโลยีเฮอร์เดิลเป็นการเลือกใช้ปัจจัยหรือวิธีการต่างๆ มาใช้ร่วมกันอย่างเหมาะสมในอาหารแต่ละชนิด เพื่อการควบคุมทั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียและเทคโนโลยีนี้ไม่ได้เน้นเพียงการควบคุมจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับการรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร รวมทั้งความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตอาหารและการขนส่งอีกด้วย การเสื่อมคุณภาพของอาหารอาจเกิดขึ้นได้ในหลายขั้นตอนตั้งแต่เริ่มเก็บเกี่ยววัตถุดิบจนถึงการนำอาหารมาบริโภค เช่น ในช่วงการเจริญของพืชหรือ

สัตว์ สภาวะในการเก็บเกี่ยวหรือการฆ่าสัตว์ การเก็บรักษาวัตถุดิบที่ได้จากพืชหรือสัตว์ การขนส่ง การพัฒนาสูตรของผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต การบรรจุ การจำหน่าย การเก็บรักษาภายในครัวเรือนและการนำไปบริโภค ตารางที่ 6.1 แสดงสาเหตุต่างๆ ของการเสื่อมเสียของอาหาร

ตารางที่ 6.1 สาเหตุต่างๆ ที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย

เคมี	กายภาพ	เอนไซม์	จุลินทรีย์
การหืน (oxidative rancidity) การเปลี่ยนสี (discoloration) การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ การสูญเสียธาตุอาหาร	การถ่ายเทมวล การเคลื่อนที่ของสารโมเลกุลขนาดเล็ก การสูญเสียความกรอบ การสูญเสียกลิ่นรส โครงสร้างของอาหารถูกทำลายจากการแช่เยือกแข็ง	การหืน (lipolytic rancidity) การหืนเนื่องจาก lipoxygenase การย่อยสลายโปรตีน การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์	การเจริญหรือปนเปื้อนของจุลินทรีย์ การเจริญของเชื้อโรค การเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นว่าสาเหตุหลักในการเสื่อมเสียของอาหาร ได้แก่ การเสื่อมเสียทางกายภาพ เช่น การสูญเสียความชื้นจากการถ่ายเทมวลสารระหว่างในและนอกภาชนะบรรจุ หรือระหว่างองค์ประกอบที่มีในอาหาร การเสื่อมเสียทางเคมี เช่น การหืนจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือจากออกซิเจน (oxidative rancidity) การเสื่อมเสียเนื่องมาจากเอนไซม์ เช่น การหืนจากการย่อยสลายไขมัน (lipolysis) และการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดโรคหรือมีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค ดังนั้นจุดประสงค์ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร จะต้องสามารถควบคุมการเสื่อมเสียของคุณภาพที่จะเกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆได้แต่ที่สำคัญคือการลดโอกาสที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคเนื่องมาจากการเจริญของจุลินทรีย์ทั้งชนิดที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียและชนิดที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ (ICMSF, 1996)

เทคโนโลยีต่างๆ ที่นำมาใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยส่วนใหญ่จะสามารถยับยั้งหรือทำลายจุลินทรีย์ รวมทั้งการทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตช้าลง ซึ่งจะต้องใช้ปัจจัยต่างๆที่มีประสิทธิภาพดีและมีผลต่อการรอดชีวิตและการเจริญของจุลินทรีย์ Mossel และ Ingram (1955) และ Mossel (1983) ได้แบ่งประเภทของปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ปัจจัยภายใน (intrinsic factors) ได้แก่ ปัจจัยทางกายภาพและเคมี ที่อยู่ในตัวอาหาร ซึ่งสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ โดยที่จุลินทรีย์ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

2. ปัจจัยกระบวนการผลิต (processing factors) ได้แก่ วิธีการต่างๆ ที่จงใจนำมาใช้กับอาหารเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษา
3. ปัจจัยภายนอก (extrinsic factors) ได้แก่ ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในอาหาร แต่เป็นปัจจัยที่ใส่เข้าไปจากภายนอกอาหารและมีประสิทธิภาพในระหว่างการเก็บรักษาอาหาร
4. ปัจจัยที่มีอยู่ (implicit factors) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับธรรมชาติของจุลินทรีย์ที่ปรากฏและมีปฏิกิริยาซึ่งกันและกันภายในสภาพแวดล้อมที่จุลินทรีย์นั้นสัมผัสในระหว่างการเจริญเติบโต
5. ผลโดยรวม (net effects) ซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการรวมกัน (combinations) ของปัจจัยที่อาจจะไม่สามารถทำนายผลได้แน่นอน แต่คาดว่าอาจจะมีผลมากกว่าปัจจัยหนึ่งเพียงปัจจัยเดียว

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีต่างๆ ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารจะช่วยทำให้การเสื่อมเสียของคุณภาพอาหารลดน้อยลง เทคโนโลยีต่างๆ ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารที่ใช้ในปัจจุบันสรุปได้ดังตารางที่ 6.2 และเทคโนโลยีที่มีการคิดค้นขึ้นใหม่เพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร แสดงดังตารางที่ 6.3

จากตารางที่ 6.2 จะเห็นว่าเทคนิคส่วนใหญ่ที่ใช้ยืดอายุการเก็บรักษาอาหารในปัจจุบัน จะช่วยชะลอการเจริญของจุลินทรีย์มากกว่าการทำลายให้หมดไป เช่น การแช่เย็น (chilling) การแช่เยือกแข็ง (freezing) การทำแห้ง (drying) การเคียวริ่ง (curing) การแช่อิ่มหรือฉาบน้ำตาล (conserving) การบรรจุแบบสุญญากาศ (vacuum packaging) การบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศ (modified atmosphere packaging) การปรับสภาพให้เป็นกรด (acidifying) การหมัก (fermenting) และการเติมสารกันเสีย (adding preservatives) ในส่วนของเทคนิคอื่นๆ ที่สามารถทำลายจุลินทรีย์มากกว่าที่จะยับยั้ง เช่น การพาสเจอไรส์ (pasteurization) และการสเตอริไลส์ (sterilization) ด้วยความร้อน นอกจากนั้นเทคนิคหรือวิธีการนอกเหนือจากนี้ เป็นการป้องกันหรือจำกัดไม่ให้จุลินทรีย์ปนเปื้อนหลังจากผ่านการแปรรูปอาหาร เช่น กระบวนการปลอดเชื้อ (aseptic processing) และ กระบวนการบรรจุ (packaging)

ในปัจจุบันผู้บริโภคอาหารต้องการอาหารที่สดและมีคุณภาพสูง มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติ มีการเติมสารเคมีหรือวัตถุเจือปนอาหารน้อยลงและเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ดังนั้นเทคนิคหรือวิธีการที่คิดค้นขึ้นใหม่ที่แสดงในตารางที่ 6.3 จากตารางจะเห็นว่าเทคนิคส่วนใหญ่

ตารางที่ 6.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบันในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

วัตถุประสงค์	ปัจจัย	วิธีการ
ชะลอหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์	ลดอุณหภูมิ	แช่เย็นหรือแช่เยือกแข็งขณะขนส่งและเก็บรักษา
	ลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้หรือเพิ่มออสโมลาลิตี้ (osmolality)	ทำแห้งและทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การเคียวริ่งด้วยเกลือ การเติมน้ำตาล
	ลดออกซิเจน	บรรจุแบบสุญญากาศหรือใช้ไนโตรเจน
	เพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์	บรรจุแบบควบคุมหรือดัดแปลงบรรยากาศ
	ลดค่า pH	เติมกรด หรือหมักกรดแลกติกหรืออะซิติก
	จำกัดการได้รับอาหาร	ควบคุมโครงสร้างขนาดเล็ก และช่องว่างระหว่างเฟสในอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน
	การใช้วัตถุกันเสีย	เติมวัตถุกันเสีย ทั้งชนิดอนินทรีย์ (ซัลไฟต์ ไนไตรท์) ชนิดอินทรีย์ (โพรพิโอเนต ซอร์เบต เบนโซเอท พาราเบน) แบคทีริโอซิน (ไนซิน) สารต้านเชื้อรา (นาตามัยซิน ไพมาริซิน)
การทำลายจุลินทรีย์	ความร้อน	เทอร์ไมเซชัน เพื่อทำให้จุลินทรีย์บาดเจ็บ พาสเจอไรเซชัน เพื่อทำลายจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ทนความร้อน สเตอริไลเซชัน เพื่อทำลายสปอร์จุลินทรีย์
การป้องกันการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์	ลดการปนเปื้อน (decontamination)	ในซากสัตว์ ผักและผลไม้ โดยใช้ไอน้ำ กรดอินทรีย์ ไฮโปคลอไรท์ และโอโซน ในองค์ประกอบอาหารใช้ความร้อนและฉายรังสี และในภาชนะบรรจุใช้ความร้อน ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และฉายรังสี
	กระบวนการปลอดเชื้อ (aseptic processing)	กระบวนการให้ความร้อนและบรรจุโดยปราศจากการปนเปื้อนซ้ำ

ที่มา : Gould (1989)

ตารางที่ 6.3 เทคโนโลยีที่คิดค้นขึ้นใหม่ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

กระบวนการทางกายภาพ
การฉายรังสีแกมมาและลำอิเลคตรอน ใช้ในการทำลายพาราสิตและเชื้อโรค ใช้พาสเจอไรส์และสเตอริไลส์
การใช้ความดันสูง ใช้ยับยั้งเซลล์จุลินทรีย์ ยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้บริโภค
การใช้กระแสไฟฟ้าแบบจังหวะ ใช้ยับยั้งเซลล์จุลินทรีย์ในอาหารเหลว
การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ร่วมกับความร้อนและความดัน เพื่อลดอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อในอาหารเหลว
การใช้เลเซอร์ความเข้มสูงหรือคลื่นแสง ใช้ลดการปนเปื้อนในอาหารเหลวที่ใสและผิวหน้าภาชนะบรรจุ
การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงแบบจังหวะ
การใช้สารเคมีจากธรรมชาติ
จากสัตว์ เช่น ไลโซไซม์ ในไข่ไก่ เพื่อป้องกันการเจริญของสปอร์ *Cl. tyrobutyricum* ในเนยแข็ง
ระบบแลคโตเพอร์ออกซิเดส เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำนม
แลคโตเฟอร์ริน (lactoferrin) แลคโตเฟอร์ริซิน (lactoferricin)
จากพืช เช่น เครื่องเทศและสมุนไพร
จากจุลินทรีย์ เช่น แบคทีริโอซิน เช่น ไนซิน (nisin) เพดดิโอซิน (pediocin) สารต้านเชื้อรา
นาตามัยซิน (natamycin) ไพมาริซิน (pimaricin)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Leistner and Gould (2002)

สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ เช่น การใช้ความดันสูง (high hydrostatic pressure) การใช้กระแสไฟฟ้าแรงสูงแบบจังหวะ (high voltage electric pulses) การใช้เลเซอร์ความเข้มสูง (high intensity laser) และการใช้คลื่นแสงแบบจังหวะ (noncoherent light pulses) นอกจากนั้นยังมีการนำสารที่ได้จากธรรมชาติจากแหล่งต่างๆ มาใช้ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์แทนที่การใช้สารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุกันเสีย เป็นต้น และในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารด้วยวิธีการที่ไม่รุนแรง อาจทำได้โดยการใช้วิธีการตั้งแต่ 2 วิธีร่วมกัน เช่น การทำให้สุกและการแช่เย็น (cook - chill) โดยใช้แนวคิดเฮอร์เดิลมาช่วย ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

การใช้อุณหภูมิต่ำในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการเจริญของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีขีดจำกัดในการเจริญที่อุณหภูมิต่ำแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 6.4 จากตารางจะเห็นว่าจุลินทรีย์ที่สำคัญที่ทำให้เกิดโรคในอาหารเช่น *Clostridium perfringens* หรือ *Cl. botulinum* สายพันธุ์ที่ย่อยสลายโปรตีน (proteolytic types) จะไม่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12 องศาเซลเซียส ในขณะที่สายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายโปรตีน (non proteolytic types) มีอุณหภูมิต่ำสุดที่เจริญได้คือ 3 องศา

เซลเซียส นอกจากนั้นเชื้อโรคบางชนิด เช่น *Listeria monocytogenes* *Aeromonas hydrophila* *Yersinia enterocolitica* จะสามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำใกล้เคียง 0 องศาเซลเซียส ในส่วนของ

ตารางที่ 6.4 อุณหภูมิต่ำสุดที่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้

จุลินทรีย์	**อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถเจริญได้ (องศาเซลเซียส)**
Campylobacter species	32
Clostridium botulinum (สายพันธุ์ที่ย่อยสลายโปรตีน)	12
Clostridium perfringens	12
Bacillus cereus (ชนิดมีโซไฟล์)	10
Escherichia coli	7
Staphylococcus aureus	7
Bacillus cereus (ชนิดไซโครไฟล์)	5
Salmonellae	5
Vibrio parahaemolyticus	5
Lactic acid bacteria (ส่วนใหญ่)	5
Clostridium botulinum (สายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายโปรตีน)	3
Listeria monocytogenes	0
Micrococcus บางสปีชีส์	0
Aeromonas hydrophila	0
Yersinia enterolitica	- 1
Pseudomonas fluorescens	- 2
ยีสต์และเชื้อราบางชนิด	-7

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียบางชนิดที่ไม่สร้างสปอร์ จะสามารถเจริญได้อย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง -7 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิประมาณ -10 องศาเซลเซียส พบว่าจุลินทรีย์จะไม่สามารถเจริญได้ อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าอาหารแช่เยือกแข็งบางชนิด เช่น ถั่วพีแช่เยือกแข็ง (frozen peas) จะเสื่อมเสียอย่างช้าๆ จากยีสต์ แม้ว่าจะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ –17 องศาเซลเซียส (Collins and Buick, 1989) ในส่วนของการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็ง จะช่วยลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (water activity) ของอาหาร ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิดได้ โดยกลไกการยับยั้งไม่ได้มีสาเหตุจากอุณหภูมิต่ำแต่เกิดจากค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ต่ำลง และเนื่องจากเชื้อราและยีสต์มีความทนทานต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ต่ำมากกว่าแบคทีเรีย ทำให้สามารถเจริญในอาหารแช่เยือกแข็งได้ดีกว่า (Leistner and Gould, 2002)

การยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยการแช่เย็นและการแช่เยือกแข็งนั้น จะสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพในประเทศอุตสาหกรรมที่เจริญแล้วมากกว่าประเทศที่กำลังพัฒนา ทั้งนี้เนื่องจากประเทศในกลุ่มหลังจะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานที่สูงและการใช้ไฟฟ้ายังมีไม่ทั่วถึง นอกจากนั้นการที่มีสภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง จะทำให้การใช้อุณหภูมิต่ำในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารมีความลำบากมากยิ่งขึ้น

การลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ในอาหาร

การลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ในอาหาร สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การเคียวริ่ง (curing) โดยการเติมเกลือ การเติมน้ำตาลหรือการแช่อิ่ม (conserving) การเติมตัวถูกละลายชนิดอื่นๆ และการกำจัดน้ำออกจากอาหารโดยการทำแห้ง (drying) รวมทั้งการแช่เยือกแข็ง ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดที่จุลินทรีย์บางชนิดที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียและเชื้อโรคสามารถเจริญได้ แสดงดังตารางที่ 6.5 จากตารางจะเห็นว่าพวก pseudomonads ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบว่าทำให้อาหารโดยทั่วไปเกิดการเสื่อมเสียนั้น จะทนต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำน้อยที่สุด โดยไม่สามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำกว่า 0.97 ในส่วนของ clostridia และ bacilli ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้งการเจริญถ้าค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำกว่า 0.94 และ 0.93 ตามลำดับ แต่มี bacilli บางชนิดที่เจริญได้ที่ต่ำกว่า 0.90 เชื้อ *Staphylococcus aureus* ในสภาวะที่มีอากาศจะสามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุด 0.86 แต่ในสภาวะที่ไม่มีอากาศจะเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดที่ 0.91 และพวกยีสต์และเชื้อราส่วนใหญ่จะสามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดที่ 0.86 และยีสต์จำพวกออสโมฟิลิก (osmophilic yeasts) และเชื้อราพวกซีโรฟิลิก (xerophilic molds) สามารถเจริญได้อย่างช้าๆ ที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดประมาณสูงกว่า 0.6 เพียงเล็กน้อย ดังนั้นอาหารแห้ง (dried foods) โดยทั่วไปส่วนใหญ่มักมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ประมาณ 0.3 เพื่อป้องกันไม่ให้มีการเจริญของจุลินทรีย์ และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ระดับนี้จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพต่ำที่สุด (Leistner and Gould, 2002)

อาหารแปรรูปส่วนใหญ่ในประเทศที่กำลังพัฒนามักจะมีความชื้นปานกลางโดยมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อยู่ระหว่าง 0.90 – 0.60 และอาหารบางชนิดอาจมีค่านี้ต่ำกว่า 0.60 ทำให้สามารถเก็บรักษาได้โดยไม่ต้องอาศัยความเย็น อย่างไรก็ตามอาหารที่พบบางประเภทอาจไม่จัดอยู่ในประเภทที่มีความชื้นปานกลางเนื่องจากมีรสชาติที่เค็มหรือหวานเกินไปและเนื้อสัมผัส หรือลักษณะปรากฏไม่เป็นที่ดึงดูดใจของผู้บริโภคในวัยหนุ่มสาว ทำให้เกิดการพัฒนาอาหารประเภทที่มีความชื้นสูง

ตารางที่ 6.5 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดที่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้

จุลินทรีย์	ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่ำสุดที่สามารถเจริญได้ (องศาเซลเซียส)
Campylobacter species	0.98
Pseudomonas fluorescens	0.97
Aeromonas hydrophila	0.97
Clostridium botulinum type E	0.96
Clostridium perfringens	0.96
Lactic acid bacteria (ส่วนใหญ่)	0.95
Salmonellae	0.95
Escherichia coli	0.95
Vibrio parahaemolyticus	0.95
Clostridium botulinum type A	0.94
Bacillus cereus	0.93
Listeria monocytogenes	0.92
Lactic acid bacteria บางชนิด	0.92
Staphylococcus aureus (anaerobic)	0.91
Bacillus spp. บางชนิด (aerobic)	0.89
Staphylococcus aureus (aerobic)	0.86
Micrococcus halodenitrificans	0.85
Byssochlamys nivea	0.84
Aspergillus flavus	0.80
Halobacterium halobium	0.75
Eurotium amstelodami	0.70
Wallemia sebi	0.69
Zygosaccharomyces rouxii	0.62
Xeromyces bisporus	0.61

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

(ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้สูงกว่า 0.90) เพิ่มมากขึ้นและมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีกว่าซึ่งกระทำได้โดยการใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิล อย่างไรก็ตามความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีเฮอร์เดิลในประเทศกำลังพัฒนาจะมีการนำมาประยุกต์ใช้บ้างแล้ว แต่การวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้นั้นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้บรรดาผู้ผลิตอาหารในระดับอุตสาหกรรมของ

ประเทศดังกล่าวจึงยังคงใช้วิธีการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแบบดั้งเดิมโดยใช้สูตรที่ใช้ต่อกันมาจากรุ่นก่อน

การปรับลดค่า pH

ค่า pH ในอาหาร เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญและกลุ่มหรือชนิดของจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในอาหาร ค่า pH ที่ต่ำที่สุดที่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้แสดงดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ค่า pH ต่ำที่สุดที่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญได้

จุลินทรีย์	**ค่า pH ต่ำที่สุดที่สามารถเจริญได้ (องศาเซลเซียส)**
Bacillus cereus	5.0
Clostridium perfringens	5.0
Campylobacter species	4.9
Vibrio parahaemolyticus	4.8
Clostridium botulinum	4.6
Escherichia coli	4.4
Pseudomonas fluorescens	4.4
Listeria monocytogenes	4.3
Yersinia enterolitica	4.2
Staphylococcus aureus	4.0
Salmonellae (ส่วนใหญ่)	3.8
Bacillus coagulans	3.8
Lactic acid bacteria (ส่วนใหญ่)	3.0 – 3.5
Gluconobacter species	3.0
Acetobacter species	3.0
Bacillus acidocaldarius	2.5
Alicyclobacillus	2.0
Aspergillus flavus	2.0
Saccharomyces cerevisiae	1.6
Candida krusei	1.3

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

ค่า pH ที่สำคัญของอาหารที่ใช้บ่งบอกว่าเชื้อ *Clostridium botulinum* ซึ่งเป็นเชื้อที่ก่อให้เกิดอันตรายเนื่องจากการสร้างสารพิษในอาหารคือที่ pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งเป็นค่า pH ในระดับที่สูงของอาหารกลุ่มที่มีความเป็นกรดต่ำ (low acid foods) โดยที่เชื้อนี้ไม่สามารถเจริญได้ แต่เชื้อชนิดอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษโดยส่วนใหญ่ จะถูกยับยั้งการเจริญได้ที่ค่า pH ต่ำกว่า 4.2 ในส่วนของเชื้อที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียซึ่งสามารถเจริญได้ที่ค่า pH ต่ำกว่าระดับนี้ ได้แก่พวกแบคทีเรียแลกติก รวมทั้งยีสต์และเชื้อราซึ่งส่วนใหญ่สามารถเจริญได้ที่ค่า pH ต่ำกว่า 3.0

การปรับลดค่า pH ของอาหารในประเทศที่กำลังพัฒนาเป็นวิธีการที่นำมาใช้กันมาก โดยเฉพาะกับผลไม้ซึ่งโดยปกติจะมีค่า pH ที่ต่ำตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามรสชาติของอาหารที่เกิดขึ้นในอาหารชนิดหนึ่งๆ ในประเทศที่แตกต่างกัน จะได้รับการยอมรับที่แตกต่างกัน เช่น รสเปรี้ยวของไส้กรอกซึ่งในประเทศจีนหรือญี่ปุ่นจะบ่งบอกถึงการเสื่อมเสีย ในขณะที่ประเทศทางตะวันตกจะได้รับการยอมรับ เป็นต้น ในส่วนของการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยปรับค่า pH ของอาหารให้สูงขึ้น เช่น ในประเทศจีนที่มีการผลิตไข่เยี่ยวม้า โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) โดยค่า pH ของไข่ขาวจะเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 11.0 และในไข่แดงมีค่า pH สูงประมาณ 9.0 ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อโรค เช่น *Salmonella enteritidis* และทำให้โปรตีนในไข่ตกตะกอน (coagulation) ทำให้สามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้องและนำมาใช้รับประทานได้โดยไม่ต้องนำมาให้ความร้อน อย่างไรก็ตามการปรับค่า pH ของอาหารให้สูงขึ้นมีข้อจำกัดในเรื่องของคุณภาพทางประสาทสัมผัส จึงมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้กับอาหาร

การใช้สารกันเสีย (preservatives)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของสารกันเสียจากการปรับลดค่า pH ในอาหารจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่มีอยู่ในอาหาร สารกันเสียชนิดที่เป็นกรดอินทรีย์อ่อน (weak organic acids) เช่น กรดซอร์บิก (sorbic acid) กรดเบนโซอิก (benzoic acid) และกรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรด อนินทรีย์เช่น ซัลไฟต์ (sulfite) และไนไตรท์ (nitrite) จะมีประสิทธิภาพดีที่ค่า pH ต่ำ และสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมักจะมีประสิทธิต่ำที่ค่า pH ที่เป็นกลาง ชนิดของสารกันเสียที่นิยมใช้ในอาหารแสดงดังตารางที่ 6.7 ในส่วนของประเทศที่กำลังพัฒนามีการใช้สารกันเสีย เช่น ซอร์เบต (sorbate) และไนไตรท์ (nitrite) (ใช้แทนไนเตรท (nitrate)) เพิ่มมากขึ้น แต่การเติมสารเหล่านี้ในอาหารอาจไม่ใช่ระดับที่ถูกต้องและขาดการควบคุม ทำให้สารกันเสียมีประสิทธิภาพไม่แน่นอน ซึ่งอาจแก้ไขโดยการนำหลักเกณฑ์ที่ดีในการผลิตอาหาร (good manufacturing practice) มาใช้ (Leistner and Gould, 2002)

ตารางที่ 6.7 สารกันเสียบางชนิดและการประยุกต์ใช้ในอาหาร

สารกันเสีย	ตัวอย่างอาหารที่นิยมใช้
กรดไลโปฟิลิก (lipophiilic acids) และ เอสเทอร์ (esters) อย่างอ่อน	
ซอร์เบต (sorbate)	เนยแข็ง (cheeses) ไซรัป (syrup) เค้ก เดรสซิ่ง (dressings) เนื้อสัตว์
เบนโซเอท (benzoate)	อาหารดอง (pickles) เครื่องดื่ม เดรสซิ่ง
พาราไฮดรอกซีเบนโซเอทเอสเทอร์ (p-hydroxybenzoate esters)	มาริเนดจากปลา (marinaded fish products)
โพรพิโอเนต (propionate)	ขนมปัง เค้ก เนยแข็ง เมล็ดพืช (grains)
กรดอินทรีย์ (organic acids)	ซอสที่มีความเป็นกรดต่ำ มายองเนส เดรสซิ่ง น้ำสลัด เครื่องดื่ม น้ำผลไม้ และผลิตภัณฑ์เข้มข้น
กรดอะซีติก (acetic) แลกติก (lactic) ซิตริก (citric) มาลิก (malic) และอื่นๆ	
กรดอนินทรีย์ (inorganic acids)	ซอสที่มีความเป็นกรดต่ำ มายองเนส เดรสซิ่ง น้ำสลัด เครื่องดื่ม น้ำผลไม้ และผลิตภัณฑ์เข้มข้น
ฟอสฟอริก (phosphoric) ไฮโดรคลอริก (HCl)	
แอนไอออนอนินทรีย์ (inorganic anions)	
ซัลไฟต์ (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมตาไบซัลไฟต์)	ชิ้นผลไม้ ผลไม้อบแห้ง ไวน์ เนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์ cured meats
ไนไตรท์ (nitrite)	
สารปฏิชีวนะ (antibiotics)	
ไนซิน (nisin)	เนยแข็ง อาหารบรรจุกระป๋อง
นาตามัยซิน (natamycin) (ไพมาริซิน, pimaricin)	ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ cured meats ทำแห้ง
ควัน (smoke)	เนื้อสัตว์และปลา

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

การบรรจุแบบสุญญากาศ (vacuum packaging) และการบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศ (modified atmosphere packaging)

โดยทั่วไปการบรรจุแบบนี้มักจะเริ่มต้นจากการลดปริมาณออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุเพื่อจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศหรือออกซิเจน (aerobes) และชะลอการเจริญของพวกที่ใช้หรือไม่ใช้แก๊สออกซิเจน (facultative anaerobes) และมีการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปภายในภาชนะบรรจุ เพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อโดยจะให้ผลดีที่อุณหภูมิต่ำ การเลือกใช้แก๊สชนิดเดียวหรือแก๊สผสมตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป จะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการยืดอายุการเก็บรักษา มีรายงานว่าปริมาณออกซิเจนระดับสูงจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการทำลายจุลินทรีย์ เนื่องจาก มีปริมาณของอนุมูลอิสระ (radicals) เช่น ซุปเปอร์ออกไซด์ (superoxide) และไฮดรอก

ซิล (hydroxyl radicals) มากขึ้น ปัจจุบันในประเทศที่กำลังพัฒนามีการใช้การบรรจุแบบสุญญากาศเพิ่มมากขึ้น แต่การบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศยังมีการใช้น้อยเนื่องจากต้องลงทุนสูงและยังขาดแคลนแก๊สที่นำมาใช้ในกระบวนการ

โครงสร้างขนาดเล็ก (microstructure)

ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารอิมัลชัน (emulsions) ชนิดน้ำในน้ำมัน (water in oil) เช่น เนยบัตเตอร์ (butter) มาร์การีน (margarines) และสเปรดไขมันต่ำ (low fat spreads) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น ช่องว่างระหว่างเม็ดของน้ำและส่วนที่เป็นน้ำมัน ซึ่งถ้ามีการเตรียมอาหารประเภทนี้อย่างถูกต้องตามสุขลักษณะ จะทำให้ส่วนที่เป็นเม็ดน้ำที่มีขนาดเล็กส่วนใหญ่ปราศจากจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้ นอกจากนั้นการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เข้าไปยังส่วนที่เป็นน้ำนี้จะถูกปกป้องจากน้ำมันซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous lipid phase) ซึ่งความคงตัวของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษาอาหารประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับความสะอาดในขั้นตอนการเตรียม รวมทั้งการสร้างและการทำให้เม็ดของเหลวขนาดเล็กคงตัว ขนาดและการกระจายตัวของน้ำในน้ำมันและในบางครั้งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารกันเสียที่ใช้ ในส่วนของประเทศที่กำลังพัฒนายังคงมีการศึกษาเกี่ยวกับทางด้านนี้ไม่มากนัก เนื่องจากเป็นการศึกษาในเชิงลึกและจำเป็นต้องใช้เครื่องมือขั้นสูงที่มีความสลับซับซ้อนและมีราคาแพง เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน (electron microscopy) และการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) ซึ่งต้องอาศัยความรู้และความเชี่ยวชาญในการใช้

การใช้ความร้อน (heat) ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

การพาสเจอไรส์และการสเตอริไลส์อาหารเป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญและนิยมใช้กันมาอย่างต่อเนื่อง การทนต่อความร้อนของจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสปีซีส์ (species) หรือสายพันธุ์ (strain) รวมทั้งสภาวะที่เป็นเซลล์ปกติ (vegetative cell) หรือสปอร์ (spore) ค่า D (D – values) ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ความร้อนในการทำให้จุลินทรีย์ลดลง 90% หรือ 1 วงจรลอก (log cycle) ของจุลินทรีย์บางชนิดแสดงดังตารางที่ 6.8 จากตารางจะเห็นว่า *Campylobacter jejuni* เป็นเชื้อที่ทนร้อนได้ต่ำที่สุด โดยมีค่า D เพียงไม่กี่วินาทีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสามารถทำลายเชื้อนี้ได้โดยใช้การพาสเจอไรส์ในขณะที่พวกเอนเทอโรคอคไค (enterococci) บางชนิด มีค่า D สูงกว่ามาก ซึ่งจะสามารถรอดชีวิตและทำให้อาหารที่ผ่านการพาสเจอไรส์เกิดการเสื่อมเสียได้ จุลินทรีย์จำพวกยีสต์และเชื้อรามีความทนต่อความร้อนอยู่

ตารางที่ 6.8 ค่า D ในการทำลายสปอร์หรือเซลล์ของจุลินทรีย์บางชนิด

จุลินทรีย์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า D โดยประมาณ (นาที)
เซลล์ปกติ (vegetative cells)		
Campylobacter jejuni	60	0.1 – 0.2
Salmonella sp. ส่วนใหญ่	60	0.1 – 2.5
Escherichia coli	60	2
Staphyloccus aureus	60	5
Listeria monocytogenes	60	3 – 8
Salmonella senftenberg 775W	60	6 – 10
Enterococcus faecalis	60	5 – 20
ยีสต์และเชื้อรา		
Saccharomyces cerevisiae	60	4
Byssochlamys nivea และ *fulva* (ascospore)	80	5
Talaromyces sp. ส่วนใหญ่	80	8 – 200
สปอร์แบคทีเรีย		
Clostridium botulinum type E	80	0.3 – 3
C. tyrobutyricum	80	13
C. perfringens	90	4.5 – 120
C. botulinum type A	100	7 – 28
C. sporogenes PA 3679	110	21
Bacillus stearothermophilus	120	1 – 5.8
C. thermosaccharolyticum	120	3 - 4

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

ระหว่างเซลล์แบคทีเรียและสปอร์ของแบคทีเรีย แต่แอสโคสปอร์ของเชื้อรา *Byssochlamys* และ *Talaromyce* จะมีความทนต่อความร้อนสูงใกล้เคียงสปอร์แบคทีเรียที่ทนความร้อนในระดับต่ำ ดังนั้นเชื้อนี้จึงเป็นเชื้อที่พบเสมอในการทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย ในส่วนของสปอร์แบคทีเรียนั้นพบว่าสปอร์ของ *Clostridium botulinum* type E ทนต่อความร้อนได้ต่ำสุด ในขณะที่สปอร์ของ *C. botulinum* type A จะมีค่า D ประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ในส่วนของประเทศที่กำลังพัฒนาพบว่าการใช้ความร้อนในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารเป็นกระบวนการที่สำคัญและใช้มากในการทำลายหรือยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักกระทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากขาดแคลนอุปกรณ์ในการ

ฆ่าเชื้อ ดังนั้นการพาสเจอไรส์ในประเทศต่างๆ ดังกล่าว ซึ่งมีภูมิอากาศที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารพิษได้ดีและขาดแคลนกระบวนการทำความเย็นแบบต่อเนื่อง จึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวังมากกว่าในประเทศอุตสาหกรรม

การใช้เทคนิคหรือวิธีการทางกายภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

กระบวนการทางกายภาพที่สามารถยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารและไม่ใช้ความร้อนหรือไม่ทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้แก่ การฉายรังสี (irradiation) การใช้ความดันสูง (high hydrostatic pressure) การใช้สนามไฟฟ้าแบบจังหวะ (pulsed electric fields) การใช้เลเซอร์ความเข้มสูง (high intensity laser) การใช้คลื่นแสง (light pulses) และการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ (ultrasonication) โดยมีรายงานว่าบางวิธีสามารถใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แปรรูปเล็กน้อย (minimally processed foods) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้สูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัสน้อยลง รวมทั้งยังคงคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพด้านอื่นๆ มากกว่าการแปรรูปแบบวิธีดั้งเดิม ในส่วนของรายละเอียดของบางกระบวนการหรือวิธีการที่สำคัญ ผู้เขียนได้นำเสนอหลักการและการนำไปประยุกต์ใช้ไว้แล้วในบทอื่นๆ ของเอกสารคำสอนฉบับนี้

จากเทคนิคและวิธีการต่างๆ ที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารในปัจจุบันและอนาคต แต่การนำไปประยุกต์ใช้กับอาหารนั้นจะมีความแตกต่างกันโดยอาจทำลายหรือเพียงยับยั้งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่พวกที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียและพวกที่ทำให้อาหารเป็นพิษ ถ้าการใช้ปัจจัยที่มีผลต่อจุลินทรีย์มากกว่าหนึ่งปัจจัย โดยผลที่ได้อาจเป็นผลบวก (additive) หรือผลเสริมฤทธิ์ (synergistic effect) กัน จะสามารถกล่าวได้ว่าสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากเฮอร์เดิล (hurdle effect) นั่นเอง

แนวคิดเฮอร์เดิล (Hurdle Concept)

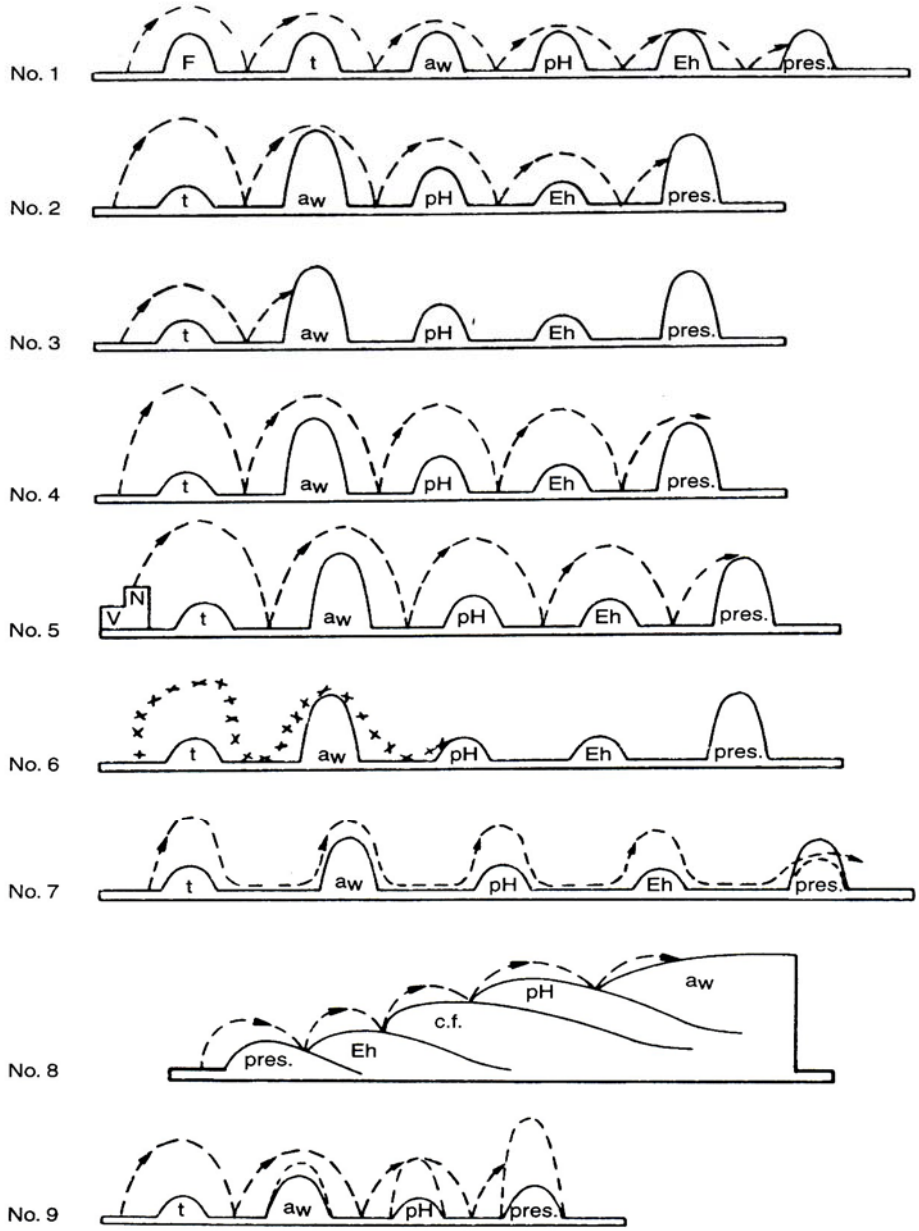
ในปัจจุบันเป็นที่ทราบแล้วว่าการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยส่วนใหญ่นั้น มิได้มีเพียงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความคงตัวและความปลอดภัยของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ แต่เกิดจากผลรวมของหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารเหล่านี้เรียกว่าเฮอร์เดิล (hurdles) (Leistner and Roedel, 1976) และต่อมาได้มีรายงานเกี่ยวกับผลของเฮอร์เดิล (hurdle effects) ซึ่งได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายมากขึ้นเมื่อแสดงให้เห็นภาพของปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของการใช้ปัจจัยหลายปัจจัยในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

แนวคิดเฮอร์เดิลรวมไปถึงผลของการใช้ปัจจัยหลายปัจจัยที่อาจให้ผลเรียงตามลำดับ (sequence) หรือให้ผลในเวลาเดียวกัน (act in unison) รวมทั้งปัจจัยที่ใช้ ได้แก่ ปัจจัยภายใน (intrinsic) ปัจจัยภายนอก (extrinsic) ปัจจัยจากกระบวนการแปรรูป (processed based) และมีความเฉพาะในอาหารชนิดหนึ่งๆ จากผลของเฮอร์เดิลดังกล่าว ทำให้เกิดเทคโนโลยีเฮอร์เดิล (hurdle technology) ขึ้นโดยมีจุดมุ่งหมายไม่เพียงแต่ทำให้อาหารเกิดความปลอดภัยและคงตัว แต่ยังปรับปรุงคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ โดยการเลือกใช้สภาวะหรือปัจจัยที่เหมาะสมและดัดแปลงเฮอร์เดิลที่มีอยู่อย่างฉลาด ขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมาคือการมุ่งผลิตอาหารที่ไม่เพียงแต่มีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์และมีความคงตัว แต่ยังต้องคงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นคุณภาพโดยรวมของอาหารนั่นเอง (Leistner,1994)

ผลของเฮอร์เดิล (Hurdle effect)

ผลของเฮอร์เดิลเป็นความสำคัญพื้นฐานในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เฮอร์เดิลหรือปัจจัยที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารนั้นจะต้องสามารถควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ปกติในอาหารแต่ละชนิดไว้ได้ การใช้ผลของเฮอร์เดิลอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถก้าวข้ามปัจจัยที่นำมาใช้ ไม่เช่นนั้นอาหารจะเกิดการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และอาจทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษได้ ตัวอย่างผลของเฮอร์เดิลแสดงดังภาพที่ 6.1

จากภาพที่ 6.1 ตัวอย่างที่ 1 แสดงให้เห็นถึงอาหารที่มีความคงตัวเมื่อใช้เฮอร์เดิลจำนวน 6 เฮอร์เดิล ได้แก่การใช้ความร้อนสูง (ค่า F) ในระหว่างการแปรรูป การใช้อุณหภูมิต่ำ (t) ในระหว่างการแช่เย็น การปรับค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) การปรับความเป็นกรด (pH) และการปรับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ของอาหาร ตัวอย่างนี้เป็นเพียงทฤษฎีเท่านั้นเนื่องจากกำแพงมีความสูงเท่ากันหรือความเข้ม (intensity) ของเฮอร์เดิลทุกเฮอร์เดิลมีค่าเท่ากัน ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นหรือพบได้ยากในอาหาร ในตัวอย่างที่ 2 จะเห็นว่าความคงตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับเฮอร์เดิลที่มีความเข้มแตกต่างกัน โดยจะเห็นว่าเฮอร์เดิลที่สำคัญหรือเป็นเฮอร์เดิลหลัก ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้และสารกันเสีย ส่วนเฮอร์เดิลที่มีความสำคัญรองลงมาได้แก่การแช่เย็น ค่า pH และรีดอกซ์โพเทนเชียล โดยจะเห็นว่าการใช้เฮอร์เดิลทั้ง 5 ชนิดจะเพียงพอในการทำลายหรือยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดที่มีอยู่ในปริมาณปกติเดิมในอาหารได้ ตัวอย่างที่ 3 แสดงการใช้เฮอร์เดิลเพียงเล็กน้อยและความเข้มต่ำซึ่งสามารถทำให้อาหารมีความคงตัวทางจุลินทรีย์ได้ ตัวอย่างเช่น การบรรจุแบบปลอดเชื้อของอาหารที่เสื่อมเสียง่าย (perishable foods) ซึ่งลดการปนเปื้อนซ้ำของอาหารที่ผ่านการให้ความร้อน เช่น ในการลดปริมาณเชื้อเริ่มต้นของเนื้อสัตว์หรือในผลไม้ที่มีความชื้นสูง โดยอาจใช้ความ



ภาพที่ 6.1 ตัวอย่างผลของเฮอร์เดิล (F – การใช้ความร้อน, t – การแช่เย็น, a_w – วอเตอร์แอคติวิตี้, pH – ความเป็นกรด, Eh – รีดอกซ์โพเทนเชียล, pres. – การใช้สารกันเสีย, V – วิตามิน, N – สารอาหาร, c.f. – จุลินทรีย์คู่แข่ง)

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

ร้อนจากไอน้ำ ซึ่งจะทำให้มีจุลินทรีย์ที่เหลือลดน้อยลงและทำให้ง่ายต่อการยับยั้งเชื้อปริมาณที่มีอยู่ดังกล่าว แต่ในทางตรงกันข้ามในตัวอย่างที่ 4 แสดงถึงการมีปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นในผลิตภัณฑ์ที่สูง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการผลิตที่ไม่ถูกสุขลักษณะ ทำให้เฮอร์เดิลที่มีอยู่ไม่สามารถกีดขวางการเจริญของเชื้อที่ปนเปื้อนดังกล่าวได้ ในส่วนของตัวอย่างที่ 5 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มี

สารอาหาร (nutrients) และวิตามิน (vitamins) ที่อุดมสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี จนสามารถข้ามเฮอร์เดิลต่างๆ ได้ และเรียกผลที่เกิดขึ้นว่าผลบูสเตอร์ (booster) หรือผลแทรมโพลิน (trampoline effect) การที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์นี้เกิดความคงตัวจากจุลินทรีย์จึงต้องเพิ่มเฮอร์เดิลหรือความเข้มของเฮอร์เดิลให้มากขึ้น ตัวอย่างที่ 6 แสดงพฤติกรรมของจุลินทรีย์ที่บาดเจ็บ เช่น สปอร์ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ผ่านการให้ความร้อนซึ่งเมื่อเกิดการงอกของเซลล์ขึ้นมาแล้วจะพบว่าเซลล์ใหม่นั้น ขาดความมีชีวิต (vitality) หรือในกรณีที่เซลล์ปกติ (vegetative cells) ของเชื้อได้รับความร้อนและเกิดการบาดเจ็บขึ้น จะทำให้ง่ายต่อการยับยั้งหรือทำลายจากเฮอร์เดิลที่มีหรือใช้ในอาหาร เช่น สารกันเสีย ซึ่งธรรมชาติของการบาดเจ็บของจุลินทรีย์ดังกล่าวจะทำให้ทนต่อความเครียดได้ต่ำลง จึงสามารถถูกยับยั้งได้โดยการใช้เฮอร์เดิลเพียงไม่กี่ชนิดหรือใช้เฮอร์เดิลที่ความเข้มต่ำ

เฮอร์เดิลบางชนิดอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ปริมาณความชื้นของอาหารที่ลดลงระหว่างการเก็บรักษา จะทำให้เฮอร์เดิลวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w hurdles) สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความคงตัวทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณีของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่เติมสารไนไตรท์และบรรจุกระป๋อง (canned cured meat) พบว่าเฮอร์เดิลสารกันสีย (preservative hurdles) จะลดลงเมื่อเก็บรักษานานขึ้น แสดงในตัวอย่างที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากหลังจากที่ไนไตรท์สลายตัวลงจนหมด จะทำให้สปอร์ที่ยังคงอยู่อาจเริ่มงอกและเจริญขึ้นมา ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียและอาจทำให้เสี่ยงต่อโรคอาหารเป็นพิษได้ ตัวอย่างที่ 8 แสดงเฮอร์เดิลที่ให้ผลตามลำดับ (sequencial action) ในไส้กรอกหมัก (fermented sausages) และในตัวอย่างที่ 9 แสดงผลของเฮอร์เดิลที่ให้ผลเสริมฤทธิ์ซึ่งกันและกันในอาหาร

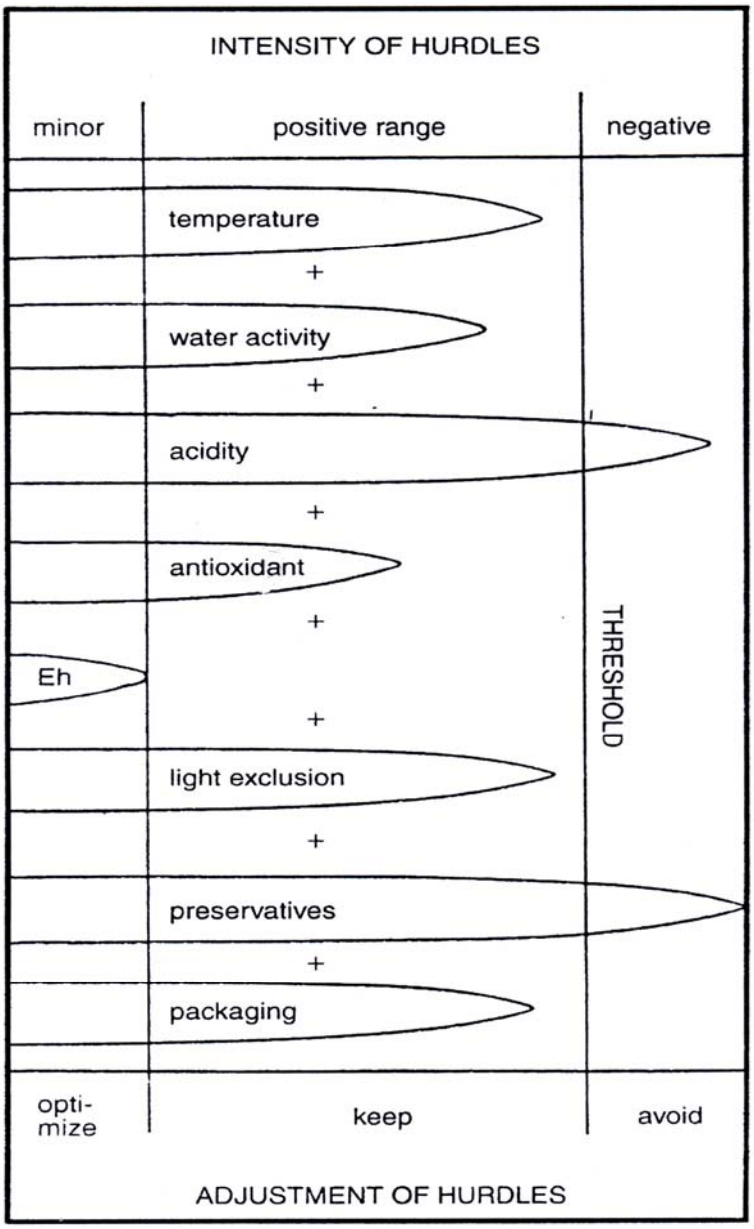
เทคโนโลยีเฮอร์เดิล (Hurdle technology)

การเลือกใช้เฮอร์เดิลหรือปัจจัยที่ฉลาด นอกจากจะช่วยปรับปรุงความคงตัวและความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังช่วยทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้นอีกด้วย Leistner (1992) รายงานถึงความสำคัญของปริมาณน้ำที่มีในผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความคงตัว ถ้าค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่เพิ่มขึ้นถูกชดเชยด้วยเฮอร์เดิลอื่นๆ เช่นค่า pH หรือค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล จะมีผลทำให้สามารถลดต้นทุนหรือเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในด้านการผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เทคโนโลยีเฮอร์เดิลนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ได้ แม้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์เลี้ยง (pet food industry) ซึ่งจากเดิมนั้น อาหารสัตว์ที่มีความคงตัวจะผลิตโดยการปรับค่าลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ให้เหลือ

ประมาณ 0.85 ซึ่งทำโดยการเติมสารเคมีโพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol) ในปริมาณที่สูงเกินและอาจทำให้มีผลร้ายแรงต่อสุขภาพของสัตว์เลี้ยง แต่ปัจจุบันจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิล พบว่าอาหารสัตว์เลี้ยงจะมีความคงตัวทางจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง แม้ว่าจะมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้สูงถึง 0.94 ก็ตาม โดยยังมีคุณค่าทางโภชนาการและรสชาติดีกว่าและทำให้ประหยัดกว่า

เทคโนโลยีเฮอร์เดิลนั้น ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้มากขึ้นทั้งในประเทศอุตสาหกรรมและประเทศที่กำลังพัฒนาในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ตามต้องการและถ้าการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารมีจุดมุ่งหมายในการประหยัดพลังงานแล้ว การนำเฮอร์เดิลอื่นๆ มาใช้แทนที่ เช่น การปรับค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ การปรับค่า pH หรือค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล เพื่อใช้แทนที่การแช่เย็นหรือการแช่เยือกแข็ง จะทำให้สามารถบรรลุจุดมุ่งหมายได้ และในปัจจุบันพบว่ามีการนำเทคโนโลยีเฮอร์เดิลไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วโลก ซึ่งแนวคิดนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าประสบผลสำเร็จและนำไปใช้ได้จริง อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าโดยแท้จริงแล้วเทคโนโลยีเฮอร์เดิล ควรจะนำมาประยุกต์ใช้โดยมีแนวคิดที่กว้างกว่านี้ กล่าวคือนอกเหนือจากคุณภาพด้านความคงตัวและความปลอดภัยจากจุลินทรีย์แล้วยังควรรวมถึงคุณภาพของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางด้านอื่นๆ อีกด้วย ซึ่งอาจรวมไปถึงคุณภาพโดยรวมของอาหาร (total quality of foods) อย่างไรก็ตามเครื่องมือ (tools) ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิลเพื่อทำให้ได้คุณภาพของอาหารโดยรวมยังมีไม่เพียงพอ ซึ่งจะเห็นได้จากการทำนายคุณภาพของอาหาร ซึ่งกระทำโดยการใช้แบบจำลอง (modeling) เป็นต้น

เฮอร์เดิลที่มีในอาหารอาจมีผลต่อความคงตัวและความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ รวมทั้งคุณภาพทางประสาทสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ เทคโนโลยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ และอาจเป็นผลลบ (negative) หรือผลบวก (positive) ต่อคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้ม (intensity) ยกตัวอย่างเช่น ในการแช่เย็นผลไม้ ถ้าใช้อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมกับผลไม้ จะทำให้เกิดผลเสีย คือเกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) ขึ้นได้ ในขณะที่การแช่เย็นที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้เป็นอย่างดี หรือในกรณีของค่า pH ของไส้กรอกหมัก (fermented sausages) ซึ่งควรจะต้องมีค่าที่ต่ำเพียงพอที่จะยับยั้งเชื้อโรคได้ แต่ต้องไม่ทำให้เกิดรสเปรี้ยวมากเกินไปจนผู้บริโภคไม่ยอมรับ เป็นต้น ดังนั้นถ้าความเข้มของเฮอร์เดิลแต่ละชนิดมีน้อยเกินไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความเข้มดังกล่าวให้มากขึ้น ขณะเดียวกันต้องลดผลเสียที่จะมีผลต่อคุณภาพโดยรวมของอาหารด้วย ในการปรับความเข้มของเฮอร์เดิลนี้ จะต้องปรับให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (optimal range) โดยคำนึงถึงทั้งความปลอดภัยและคุณภาพของอาหาร (Leistner, 1995) ดังแสดงในภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างเฮอร์เดิลคุณภาพ ซึ่งควรอยู่ในช่วงบวก (positive range) หรือการปรับลดหรือเพิ่มความเข้มของเฮอร์เดิลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ที่มา : Leistner (1994)

ในการพัฒนาแนวคิดเฮอร์เดิลมาเป็นการใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิลในการปรับปรุงความคงตัวและความปลอดภัยของอาหารทางด้านจุลินทรีย์และในเวลาต่อมาได้รวมถึงคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ ในปัจจุบันมีรายงานถึงมิติ (dimensions) ใหม่ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิล ได้แก่ การใช้เฮอร์เดิลทางด้านการแพทย์ (medical aspect) สิ่งกีดขวางของอาหาร (barriers to foods) การใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิลและเอนไซม์ เทคโนโลยีเฮอร์เดิล

เพื่อกระบวนการผลิตอาหารที่ยั่งยืน (hurdle technology for sustainable food processing) และเทคโนโลยีเฮอร์เดิลเชิงปริมาณ (quantitative approach) เป็นต้น

การตอบสนองของจุลินทรีย์ต่อเฮอร์เดิล

จากการที่จุลินทรีย์มีขนาดเล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมได้มากกว่าพวกยูคารีโอต (eukaryotic organisms) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมภายนอกที่จุลินทรีย์สัมผัสอยู่ จึงมีผลอย่างมากต่อจุลินทรีย์ ทั้งในด้านสรีรวิทยา (physiology) โดยอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการใช้เฮอร์เดิลต่างๆ ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารที่ทำให้มีผลต่อจุลินทรีย์และทำให้จุลินทรีย์สร้างกลไกบางประการเพื่อให้สามารถรอดชีวิตได้จากสภาวะหรือเฮอร์เดิลดังกล่าว โดยเรียกกลไกเหล่านี้ว่าโฮมีโอสเตซิส (homeostasis)

โฮมีโอสเตซิส (homeostasis)

กลไกโฮมีโอสเตติก (homeostatic mechanisms) เป็นกลไกที่ทำให้กิจกรรมและพารามิเตอร์ (parameters) ทางสรีรวิทยาที่สำคัญในจุลินทรีย์ยังคงดำเนินต่อไปเสมือนปกติ ซึ่งเป็นผลทำให้มีการเจริญเกิดขึ้นต่อไปและเกิดการรอดชีวิต ดังนั้นเทคโนโลยีเฮอร์เดิลที่มีประสิทธิภาพจะต้องสามารถยับยั้งหรือเอาชนะกลไกที่ตอบสนองของจุลินทรีย์โดยส่วนใหญ่หรือโฮมีโอสเตซิสนี้ได้

กลไกโฮมีโอสเตติกส่วนใหญ่ของจุลินทรีย์เป็นแบบแอคทีฟ (active) โดยเซลล์จุลินทรีย์จะใช้พลังงานในการผ่อนคลายหรือลดความเครียด (stress) ที่เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น การสังเคราะห์องค์ประกอบใหม่ การซ่อมแซมองค์ประกอบของเซลล์ที่ถูกทำลาย การเพิ่มปริมาณสารหรือโมเลกุลเฉพาะชนิดเข้าและออกจากเซลล์เมมเบรน เป็นต้น ในทางตรงกันข้ามกลไกโฮมีโอสเตติกบางประเภทของจุลินทรีย์จะเป็นแบบพาสซิฟ (passive) ซึ่งหมายถึงกลไกนี้ได้สร้างขึ้นภายในเซลล์ก่อนที่เซลล์จะสัมผัสกับกับความเครียด ตัวอย่างเช่น refractory homeostasis เป็นกลไกที่สร้างขึ้นภายในสปอร์ของแบคทีเรียในระหว่างการสร้างสปอร์ ซึ่งเป็นผลทำให้สปอร์สามารถทนต่อความร้อนและสภาวะที่ไม่เหมาะสมอื่นๆ ที่เกิดขึ้นตามมา นอกจากนี้ยังมีกลไก โฮมีโอสเตติกอีกประเภทหนึ่งที่เรียกว่า population homeostasis ซึ่งเป็นกลไกที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นเพื่อรักษาสัดส่วนของปริมาณเชื้อในสภาวะหนึ่ง ๆ ไว้ให้คงที่แม้ว่าสภาพแวดล้อมภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยอาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเชื้อแต่ละชนิด โดยอาจปรับตัวให้อยู่ร่วมกันได้หรือยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ไม่ให้เจริญจนกลายเป็นจุลินทรีย์คู่แข่ง เป็นต้น

การอ่อนแรงของเมตาโบลิซึม (metabolic exhaustion)

การอ่อนแรงของเมตาโบลิซึมเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในจุลินทรีย์ และอาจนำไปสู่กระบวนการออโตสเตอริไลเซชั่น (autosterilization) (Leistner, 1995) หรือการสเตอริไลส์อาหารโดยตัวเอง เช่นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้ออาหารบรรจุกระป๋อง โดยที่สปอร์ที่เหลือหรือรอดชีวิตจะเริ่มงอก แต่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมหรือรุนแรงมากพอที่จะสามารถยับยั้งหรือป้องกันการงอกของสปอร์ได้ เช่น การปรับลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ให้ต่ำลง จะเป็นผลให้สปอร์ที่เริ่มงอกค่อยๆ ตายลง เป็นต้น การที่ความเข้มของเฮอร์เดิลแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น จะยิ่งทำให้จุลินทรีย์ใช้พลังงานมากขึ้นจนทำให้เกิดการอ่อนแรงมากขึ้นจนกระทั่งจุลินทรีย์ถูกทำลาย ซึ่งอัตราการตาย (death rate) ของเชื้อในอาหารที่ยืดอายุการเก็บรักษาโดยการใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิลจะมีค่าสูงสุดเมื่อความเข้มของเฮอร์เดิลใกล้เคียงกับความเข้มต่ำที่สุด (minimum hurdle intensity) ที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ โดยจากรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการอ่อนแรงของเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์อาจกล่าวได้ว่าการอ่อนแรงของเมตาโบลิซึมจะเกิดได้ดีขึ้น ถ้าใช้เฮอร์เดิลมากขึ้นเนื่องจากจะทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้พลังงานมากขึ้น ในการรักษาโฮมีโอสเตซิสภายในเซลล์ไว้ภายใต้สภาวะที่มีความเครียดเกิดขึ้น และการอ่อนแรงของเซลล์ปกติ (vegetative) ของจุลินทรีย์จะเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ถ้าความคงตัวของอาหารมีค่าเข้าใกล้ขีดเริ่ม (threshold) สำหรับการเจริญของเชื้อ อุณหภูมิของการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น การที่อาหารมีสารยับยั้งจุลินทรีย์ การมีสภาวะไร้อากาศที่มากกว่าและการที่จุลินทรีย์เกิดการบาดเจ็บ ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่มีอยู่จนหมดและตายลงได้ถ้าเกิดปรากฏการณ์อ่อนแรงของเมตาโบลิซึมขึ้น

ปฏิกิริยาความเครียด (stress reactions)

ปฏิกิริยาความเครียดของจุลินทรีย์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สัมผัสกับเฮอร์เดิลที่มีหรือใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและมีผลทำให้จุลินทรีย์เพิ่มความต้านทาน (resistance) ต่อความเครียดแต่ละอย่างที่เกิดขึ้น และในบางครั้งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ กล่าวคืออาจมีผลทำให้เพิ่มระดับหรือความสามารถในการก่อโรค (pathogenicity) ของเชื้อโรคได้ มีรายงานเกี่ยวกับกลไกการตอบสนองของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปที่เรียกว่า global response เช่น กลไกการตอบสนองของจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาพขาดแคลนอาหาร (starvation) ซึ่งมักเกิดขึ้นในการเลี้ยงเชื้อ โดยที่ธาตุอาหารเริ่มหมดลง ทำให้การเจริญของเชื้อเริ่มลดช้าลงและเซลล์เข้าสู่ระยะคงที่ (stationary phase) จึงเรียกกลไกที่เกิดขึ้นนี้ว่า การตอบสนองในระยะคงที่ (stationary phase response) กลไกนี้พบว่าถูกควบคุมโดย RpoS regulator ซึ่งควบคุมการแสดงออกของ

ยีน (genes) ที่สำคัญหลายชนิดที่ทำให้เกิดการต้านทานความเครียดที่เกิดขึ้นในระยะคงที่ดังกล่าว กลไกการตอบสนองโดยทั่วไปของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของเซลล์จุลินทรีย์ เช่น การบาดเจ็บเนื่องจากความร้อน เช่น การสังเคราะห์โปรตีนที่เรียกว่า heat shock proteins และการสร้างสารอื่นๆ เนื่องจากการตอบสนองต่อความร้อนที่จุลินทรีย์ได้รับ เป็นต้น

การยืดอายุการเก็บอาหารแบบหลายเป้าหมาย (multitarget preservation)

ในการใช้เทคโนโลยีเฮอร์เดิลเพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารที่มีประสิทธิภาพ กระทำโดยการใช้เฮอร์เดิลหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาความเครียด (stress reactions) และเกิดการปรับตัว (adaptations) โดยที่เฮอร์เดิลต่างๆ ที่นำมาใช้จะมีผลต่อเป้าหมาย (target) ที่แตกต่างกันภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งโดยอุดมคติแล้วจะมีลักษณะในทางเสริมฤทธิ์ (synergistic) กันมากกว่าที่จะทำให้เกิดผลบวก (additive effects) ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแบบหลายเป้าหมายโดยใช้ไนซิน (nisin) ซึ่งทำลายเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียร่วมกับการใช้ไลโซไซม์ (lysozyme) และซิเตรท (citrate) ซึ่งทำให้เกิดการสลายของเปบติโดไกลแคน (peptidoglycan) ในผนังเซลล์ ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถซ่อมแซมให้กลับคืนมาได้ เนื่องจากการปรากฏของไนซิน เป็นต้น

การเสริมฤทธิ์กันของเฮอร์เดิลชนิดต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในอาหารนั้น จะเกิดขึ้นได้ดีถ้าเฮอร์เดิลที่ใช้สามารถทำลายเป้าหมายหลายจุดหมายที่อยู่ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ในเวลาเดียวกัน เช่น ที่เซลล์เมมเบรน (cell membranes) ดีเอ็นเอ (DNA) ระบบเอนไซม์ (enzyme systems) ที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนโฮมีโอสเตซิสของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหาร ผลจากการใช้เฮอร์เดิลหลายชนิดดังกล่าวจะทำให้การซ่อมแซมระบบโฮมีโอสเตซิส และกระบวนการสร้างโปรตีนที่เกิดขึ้นจากการเกิดความเครียด (stress shock proteins) ยากลำบากมากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดความคงตัวขึ้นได้ หรืออีกนัยหนึ่งในทางปฏิบัติ อาจกล่าวได้ว่าการใช้เฮอร์เดิลหลายชนิดที่มีความเข้มต่ำนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารดีกว่าการใช้เฮอร์เดิลเพียงชนิดเดียวที่มีความเข้มสูง เนื่องจากเฮอร์เดิลต่างๆ จะมีผลในการเสริมฤทธิ์ซึ่งกันและกันนั่นเอง

เฮอร์เดิลในอาหาร (hurdles in foods)

เฮอร์เดิลแบบดั้งเดิมที่สำคัญและใช้ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 เฮอร์เดิลที่สำคัญสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	การประยุกต์ใช้
F	อุณหภูมิสูง	ความร้อน
T	อุณหภูมิต่ำ	การแช่เย็น การแช่เยือกแข็ง
a_w	การลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้	การทำแห้ง เคียวริ่ง การแช่อิ่ม
pH	การเพิ่มความเป็นกรด	การปรับหรือการเติมกรด
Eh	การลดค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล	การกำจัดออกซิเจนหรือเติมแอสคอร์เบต เป็นต้น
Pres.	การใช้สารกันเสีย	ซอร์เบต ซัลไฟต์ ไนไตรท์และอื่นๆ
c.f.	การใช้จุลินทรีย์คู่แข่ง	การหมักโดยจุลินทรีย์

ที่มา : Leistner and Gould (2002)

จากตารางที่ 6.9 จะเห็นว่าเฮอร์เดิลที่สำคัญมีเพียงไม่กี่ชนิดและเนื่องจากเฮอร์เดิลดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเฮอร์เดิลหรือปัจจัยอื่นๆ จึงทำให้มีการนำมาใช้และมีการศึกษากันมาก การใช้เฮอร์เดิลร่วมกันโดยใช้เฮอร์เดิลที่สำคัญที่มีผลในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่สำคัญมี 3 เฮอร์เดิล ได้แก่ การลดอุณหภูมิในการเก็บรักษา การลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้และการลดค่า pH และการใช้เฮอร์เดิลที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้มี 1 เฮอร์เดิลคือการใช้ความร้อนในระดับต่ำ (mild heat treatment) โดยพบว่ามีประสิทธิภาพดีในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

ในส่วนของเฮอร์เดิลอื่นๆ ที่นำมาใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร สามารถแบ่งตามชนิดของเฮอร์เดิลแสดงดังตารางที่ 6.10 จากตารางที่ 6.10 จะเห็นว่าเป็นการแบ่งชนิดของเฮอร์เดิลทางกายภาพ เคมีกายภาพ เฮอร์เดิลจากจุลินทรีย์และเฮอร์เดิลอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการร่วม (combined process) ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารชนิดต่างๆ ได้ โดยการเลือกใช้ชนิดและความเข้มของเฮอร์เดิลจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอาหารแต่ละชนิด

ตารางที่ 6.10 เฮอร์เดิลชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการร่วมเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

เฮอร์เดิลกายภาพ ความร้อน การฉายรังสี อุณหภูมิในการเก็บรักษา พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เลเซอร์ความเข้มสูง การใช้แสงแบบจังหวะ อัลตร้าซาวน์ การใช้อัลตร้าซาวน์ร่วมกับความร้อนและความดัน การใช้ความดันสูง การบรรจุ การบรรจุและการเก็บรักษาแบบดัดแปลงบรรยากาศ การควบคุมบรรยากาศ การเก็บรักษาภายใต้ความดัน การบรรจุแบบปลอดเชื้อ การควบคุมโครงสร้างขนาดเล็ก และอื่นๆ
เฮอร์เดิลเคมีกายภาพ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ค่า pH ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล การใช้โซเดียมคลอไรด์และเกลืออื่นๆ ไนไตรท์ ไนเตรท ซัลไฟต์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน โอโซน ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ กรดอินทรีย์ สารกันเสีย กรดแลกติก กรดอะซิติก แอสคอร์เบต อีริธอร์เบต ไพโรฟอสเฟส กลูโคโนเดลต้าแลคโตน สารต้านออกซิเดชัน สารประกอบฟีนอลิก ควัน สารคีเลต การจุ่มหรือพ่นสารเคมี น้ำตาล กลีเซอรอล โพรไพลีนไกลคอล เอธานอล สารจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด เครื่องเทศ สมุนไพรและส่วนของพืชอื่น ระบบแลคโตเพอร์ออกซิเดส แลคโตเฟอร์ริน ไลโซไซม์ อะวิดิน เป็นต้น
เฮอร์เดิลจากจุลินทรีย์ จุลินทรีย์คู่แข่ง เชื้อสตาร์ทเตอร์ แบคทีริโอซิน สารต้านเชื้อรา สารปฏิชีวนะ และอื่นๆ
เฮอร์เดิลอื่น ๆ โมโนลอริน (monolaurin) กรดไขมันอิสระ เพอร์ออกไซด์กรดไขมัน ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชั่น ไคโตแซน คลอรีน และอื่นๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Leistner and Gould (2002)

เอกสารอ้างอิง

Ahvenainen, R. 1996. New approaches in improving the shelf life of minimally processed fruits and vegetables. Trends Food Sci. & Technol. 7 : 179 – 187.

Akpomedaye, D. E. and B. O. Ejechi. 1998. The hurdle effect of mild heat and heat tropical spice extracts on the growth of tree fungi in fruit juice. Food Research Int. 31(5) : 339 – 341.

Alzamora, S. M., M. S. Tapia and A. Lopez-Malo. 2000. Minimally Processed Fruits and Vegetables. Aspen Publishers, Inc. Maryland.

Barbosa-Canovas, G. V., U. R. Pothakamury , E. Palou and B. G. Swanson. 1998. Nonthermal Preservation of Foods. Marcel Dekker, Inc. , New York.

Barbosa-Cánovas G. V., J. J. Fernández-Molina, S. M. Alzamora, M. S. Tapia, A. López-Malo and J. Welti Chanes. 2003. Procedure for vegetables preserved by combined methods. *In* "Handling and Preservation of Fruits and Vegetables by Combined Methods for Rural Areas". Technical manual FAO Agricultural Services Bulletin 149. Food and Agriculture organization of the united nations.

Collins, M. A. and R. K. Buick. 1989. Effect of temperature on the spoilage of stored peas by *Rhodotorula glutinis*. Food Microbiol. 6 : 135 – 141.

Gorris, L. G. M. and B. Tausher. 1999. Quality and safety aspects of novel minimal processing technologies. pp. 325 – 339. In "*Processing Foods*". F. A. R. Oliveira and J. C. Oliveira (eds.). CRC Press LLC, Florida.

Gould, G.W. 1995. New Methods of Food Preservation. Blackie Academic and Professional, Glasgow.

Gould, G. W. 1996. Methods for preservation and extension of shelf life. Int. J. Food Microbiol. 33 : 51 – 64.

Gould, G. W. 1989. Introduction. pp. 1 – 10. *In* "Machanisms of Action of Food Preservation". G. W. Gould (ed.). Elsevier Science Publishers, Ltd., Essex.

Guynot, M. E., S. Marin, V. Sanchis and A. J. Ramos. 2004. An attempt to minimize potassium sorbate concentration in sponge cakes by modified atmosphere packaging combination to prevent fungal spoilage. Food Microbiol. 21 : 449 – 457.

ICMSF. 1996. Microorganisms in foods 5. Characteristics of microbial pathogens. Blackie Academic & Professional, London.

Jay, M. J. and G. M. Rivers. 1984. Antimicrobial activity of some food flavoring compound. J. Food Safety 6 : 129 – 139.

Ku, Jeong-Yoon, P. Sung-Oh and N. Bong-Soo. 2000. Inactivation of peroxidase by hurdle technology. Food Sci. Biotechnol. 9 (2) : 124 – 129.

Leistner, L. and Roedel, W. 1976. The stability of intermediate moisture foods with respect to microorganisms. pp. 120 – 137. *In* "Intermediated moisture foods". Applied Science Publishers, London.

Leistner, L. 1992. Food preservation by combined methods. Food Res. Int. 25 : 151 - 158.

Leistner, L. 1994. Further developments in the utilization of hurdle technology for food preservation. J. Food Eng. 22 : 421 – 432.

Leistner, L. 1995. Principles and application of hurdle technology. pp. 1 – 21. *In* "New Methods of Food Preservation". G. W. Gould (ed.). Blackie Academic and Professional, Glasgow.

Leistner, L. and L. G. M. Gorris. 1995. Food preservation by hurdle technology. Trends Food Sci. & Technol. 6 : 41 – 46.

Leistner, L. 2000. Basic aspects of food preservation by hurdle technology. Int. J. Food Microbiol. 55 : 181 – 186.

Leistner, L. and G. W. Gould. 2002. Hurdle Technologies. Combination Treatments for Food Stability, Safety and Quality. Kluwer Academic, New York.

Lopez-Malo, A. , E. Palou, J. Welti, P. Corte and A. Argaiz. 1994. Shelf stable high moisture papaya minimally processed by combined methods. Food Res. Int. 27 : 545 – 553.

Lombard, G. E., A. G. Weinert, A. Minnaar and J. R. N. Taylor. 2000. Preservation of South African steamed bread using hurdle technology. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. 33 : 138 – 143.

Mossel, D. A. A. and M. Ingram. 1955. The physiology of the microbial spoilage of foods. J. Appl. Bacteriol. 18 : 232 – 268.

Mossel, D. A. A. 1983. Essential and perspectives of the microbial ecology of foods. pp. 1 – 45. *In* "Food Microbiology". T. A. Roberts and F. A. Skinner (eds.). Academic Press, London.

Palou, E. , A. Lopez-Malo, G. V. Barbosa-Canovas, J. Welti-Chanes and B. G. Swanson. 1999. Polyphenoloxidase activity and high hydrostatic pressure and high hydrostatic pressure treated banana puree. J. Food Sci. 64(1) : 42 – 45.

Rastogi, N. K. , A. Angersbach and D. Knorr. 2000. Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration. J. Food Eng. 45 : 25 – 31.

Ren, E. H. and G. V. Barbosa-Canovas. 2000. Packaging and shelf life study of apple slices preserved by combined methods technology. pp. 207 – 223. *In* "Innovation in Food Processing". G. V. Barbosa-Canovas and G.W. Gould (eds.). Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.

Roller, S. 2003. Natural antimicrobials for processing for the minimal processing of foods. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

Ross, A. I. V., M. W. Griffiths, G.S. Mittal, and H. C. Deeth. 2003. Combining nonthermal technologies to control foodborne microorganisms. Int. J. Food Microbiol. 89 : 125 – 138.

Soliva-Fortuny, R. C., P. Elez-Martinez, M. Sebastian-Caldero and O. Martin-Belloso. 2004. Effect of combined methods of preservation on the naturally occurring microflora of avocado puree. Food Control 15 : 11 – 17.

Tapia de Daza, M. S. , S. M. Alzamora and J. Welti-Chanes. 1996. Combination of preservation factors applied to minimal processing of foods. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 36 : 629 – 659.

Welti-Chanes, J., F. S. T. Alzamora and A. Lopez-Malo and M. S. Tapia. 2000. Minimally processed fruits using hurdle technology. pp. 123 – 140. *In* "Innovations in Food Processing". G.V. Barbosa-Canovas and G. W. Gould (eds.). Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.