หน่วยที่ 8
การสเตอริไลซ์

การสเตอริไลซ์เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่อาหารที่อุณหภูมิสูงและเวลานานเพียงพอที่จะทำลายจุลินทรีย์และเอนไซม์ เป็นผลให้อาหารที่ผ่านกระบวนการสเตอริไลซ์มีอายุการเก็บรักษาได้นานอย่างน้อย 6 เดือน การให้ความร้อนสูงที่รุนแรงระหว่างการสเตอริไลซ์อาหารภายในภาชะบรรจุก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านคุณค่าทางโภชนาการและด้านประสาทสัมผัสของอาหาร การพัฒนาเทคโนโลยีของการแปรรูปอาหารในปัจจุบันจึงมีเป้าหมายหลักเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดต่อคุณภาพด้านโภชนาการและประสาทสัมผัสโดยการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหารก่อนบรรจุ (วิธีการปลอดเชื้อหรือเรียกว่า aseptic processing) หรืออาหารบรรจุในภาชนะบรรจุ

หลังจากกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในอาหารแล้ว สิ่งสำคัญที่ตามมาคือการทำอย่างไรให้อาหารอยู่ได้ในสภาวะปลอดเชื้อจุลินทรีย์นานที่สุด การใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมจึงเป็นการสร้างเราะป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์จากภายนอกเข้ามาปนเปื้อนในอาหารที่ทำการฆ่าเชื้อนั้นได้อีก (post contamination) โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการสเตอริไลซ์อาหารหลังบรรจุในภาชนะแล้วและการสเตอริไลซ์อาหารก่อนการบรรจุหรือที่เรียกว่ากระบวนการปลอดเชื้อโดยใช้อุณหภูมิสูงหรือ กระบวนการ UHT

การสเตอริไลซ์อาหารในภาชนะบรรจุ

การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าความร้อนสูงสุดที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้เพียงเล็กน้อยก็มีผลในการฆ่าเซลล์ร่างกายของแบคทีเรียได้ ขณะที่สปอร์ของแบคทีเรียสามารถอยู่รอดได้แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้มาก เนื่องจากสปอร์ของแบคทีเรียมีความทนทานต่อความร้อนสูงมากกว่าเซลล์ปกติ จุดมุ่งหมายของการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์ส่วนใหญ่จึงเป็นการทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย

คำว่า “สเตอริไลซ์” หมายถึงการทำให้ปลอดเชื้อในผลิตภัณฑ์อาหารด้วยความร้อน เนื่องจากจุดมุ่งหมายหลักของการสเตอริไลซ์คืออากรทำให้อาหารปราศจากเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและทำลายเชื้อจุลินทรีย์หรือสปอร์ที่เป็นสาเหตุของการทำให้เกิดการเน่าเสียซึ่งสามารถที่จะเจริญเติบโตในอาหารได้ที่อุณหภูมิในการเก็บรักษาตามปกติ นั่นคืออาหารที่ผ่านการสเตอริไลซ์แล้วจะต้องเก็บไว้ได้นานโดยไม่เน่าเสียและไม่ต้องแช่เย็น ทั้งนี้อาจมีจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเหลือรอดอยู่บ้างในอาหารแต่สภาวะแวดล้อมทำให้ไม่สามารถเจริญเติบโตขึ้นมาได้ อย่างไรก็ตามต้องไม่มีจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเหลือรอดอยู่ จึงเรียกกระบวนให้ความร้อนตามหลักการนี้ว่า “การฆ่าเชื้อเชิงการค้า” (commercial sterilization)

ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการสเตอริไลซ์อาหารได้แก่

1. จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ที่ทนต่อความร้อนที่อาจมีอยู่ในอาหาร
2. เงื่อนไขของการให้ความร้อน
3. pH ของอาหาร
4. ขนาดของบรรจุภัณฑ์
5. ลักษณะทางายภาพของอาหาร

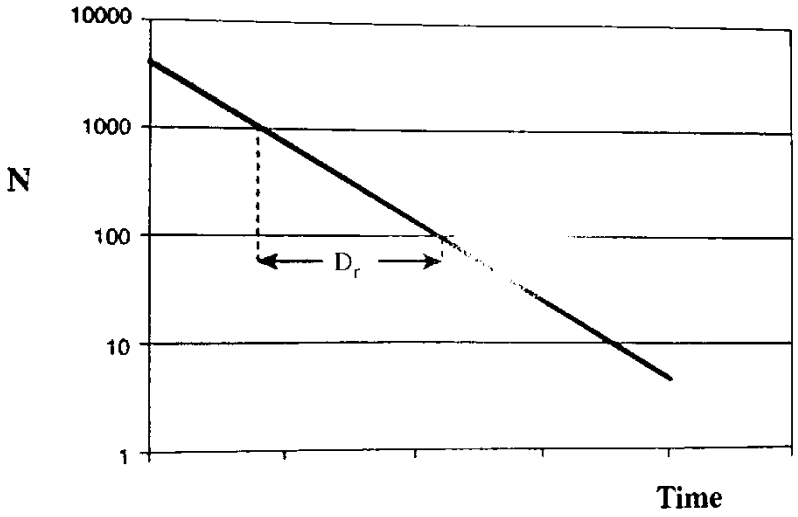
ความทนทานต่อความร้อนของจุลินทรีย์

สำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ *Clostridium botulinum* เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่อันตรายที่สุดอีกชนิดหนึ่งที่สามารถสร้างสปอร์และมีความทนทานต่อความร้อนในสภาพอาหารดังกล่าว เชื้อสามารถเจริญเติบโตและผลิตสารพิษเอ็กโซทอกซิน (exotoxin) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท ซึ่งสารพิษดังกล่าวอันตรายมากแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยทั่วไปจะมีการให้ความร้อนแก่อาหารสูงกว่าความต้องการต่ำสุดนี้ เนื่องจากอาจมีจุลินทรีย์อื่นๆที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียและคงทนต่อความร้อนมากกว่าเชื้อดังกล่าวอยู่ในอาหาร สามารถแบ่งอาหารออกตามความต้องการของการให้ความร้อน โดยจุลินทรีย์มีความทนทานต่อความร้อนในอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำมากกว่าอาหารที่มีความเป็นกรดสูง สามารถใช้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น ยีสต์หรือเอนไซม์ที่ทนความร้อนเป็นตัวกำหนดเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนในอาหารที่มีความเป้นกรดสูง วัตถุประสงค์หลักในการให้ความร้อนของอาหารที่มีความเป้นกรดสูง คือ การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ โดยเงื่อนไขที่ใช้ให้ความร้อนจะรุนแรงน้อยกว่าการสเตอริไลซ์อาหารที่มีความเป้นกรดต่ำ บางครั้งอาจเรียกการสเตอริไลซ์อาหารที่เป็นกรดสูงว่าพาสเจอไรซ์

ค่าที่เกี่ยวข้องกับการทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน

ค่า D (D-value)

ค่า D หรือค่าคงที่อัตราการตาย หมายถึง เวลาเป็นนาทีที่อุณหภูมิคงที่ที่จะทำลาย 90 เปอร์เซ็นต์ ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ไม่ว่าจุลินทรีย์เริ่มต้นจะมีปริมาณเท่าไร การหาค่า D ทำได้โดยใส่สปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทรายจำนวนแน่นอนลงในภาชนะบรรจุแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่โดยใช้เวลาต่างๆกัน นำข้อมูลไปสร้างกราฟความอยู่รอด (survivor curve) บนกระดาษเซมิล็อก โดยพลอทค่าระหว่าง log ของจำนวนเชื้อที่อยู่รอดบนแกน log (แกน Y) และเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิหนึ่งๆบนแกนธรรมดา (แกน X) กราฟที่ได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ค่า D บนกราฟความอยู่รอด (survival curve)
ที่มา : Gustavo (2003, p. 497)

ค่า D จึงหมายถึงระยะเวลาที่ทำให้เส้นกราฟลดลงไป 1 วงจรล็อก (log cycle) ค่า D จะลดลงตามลำดับเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือค่า D แสดงถึงอัตราการทำลาย (killing rate) ที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ สามารถหาค่า D ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Log}\,(N_0/N) = t/D$$

$$D = \frac{t}{\text{Log}\left(\frac{N_0}{N}\right)}$$

ขณะที่ D เป็นเวลา (นาที) t เป็นเวลาที่ให้ความร้อน (นาที) N_0 เป็นปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้น และ N คือ ปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป t นาทีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียจึงมีความสำคัญมากเนื่องจากจุลินทรีย์จะถูกทำลายด้วยความร้อนในอัตราหนึ่งซึ่งขึ้นกับจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่ขณะนั้น

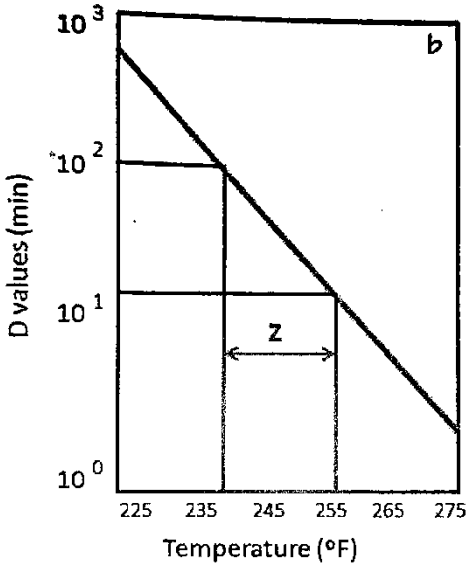
การทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อนเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วแบบเลขฐานล็อก ในทางทฤษฎีเราไม่สามารถทำลายแบคทีเรียให้เหลือ 0 ตัวได้เลย ทั้งนี้ดูได้จากกราฟแสดงการอยู่รอด ดังนั้นในทางทฤษฎีอาหารที่ผ่านการสเตอริไลซ์จะไม่ปลอดเชื้อโดยสมบูรณ์ไม่ว่าใช้เวลาในการให้ความร้อนนอนแค่ไหนก็ตาม

การทราบว่าจุลินทรีย์ใดเป็นสาเหตุของการเน่าเสียในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องเป็นสิ่งที่จำเป็นในการกำหนดเวลาในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ในกระบวนการฆ่าเชื้อเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า ความร้อนที่ทำให้ผลิตภัณฑ์

ค่า Z (Z value)

ค่า Z หมายถึง จำนวนองศาเซลเซียส หรือ องศาฟาเรนไฮท์ ที่ทำให้ ค่า D เปลี่ยนไป 1 วงจรล็อก ค่า Z ได้จากการสร้างกราฟเวลาที่ทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อนโดยการพลอทระหว่างค่า D ของจุลินทรีย์ชนิด

หนึ่งบนแกนล็อกกับอุณหภูมิที่ใช้ฆ่าเชื้อบนแกนธรรมดาดังแสดงในภาพที่ 9.2 ค่า Z ที่มีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Z ที่มีค่าน้อยกว่าเช่น ค่า Z = 12 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ Z = 7 องศาเซลเซียส หมายความว่าจะต้องเปลี่ยนอุณหภูมิในการให้ความร้อนสำหรับเชื้อที่มีค่า Z = 12 องศาเซลเซียส มากกว่าเชื้อที่มีค่า Z = 7 องศาเซลเซียส เพื่อให้ค่า D ของจุลินทรีย์นั้นๆเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่า Z ของสปอร์ C.botulinum โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 10 หรือ 18 องศาเซลเซียส ค่า Z มีประโยชน์ในการคำนวณกระบวนการให้ความร้อนที่ให้ผลเท่ากันที่อุณหภูมิต่างๆเทียบกับค่าอ้างอิงคือ ค่า Z ที่ 121 องศาเซลเซียส หรือ 250 องศาฟาเรนไฮท์



ภาพที่ 2.2 ค่า Z (Z value)

ค่า F (F value)

ค่า F หมายถึง ระยะเวลาเป็นนาทีที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งใช้ทำลายจุลินทรีย์ที่ทราบจำนวนในอาหารภายใต้สภาวะที่กำหนด การใช้ค่า F จำเป็นต้องระบุอุณหภูมิที่ใช้และค่า Z ของจุลินทรีย์ที่เป็นเป้าหมายด้วยสัญลักษณ์ F_t^Z เช่น F_{121}^{10} ถ้า Z = 10 องศาเซลเซียส และ t = 121 องศาเซลเซียส หรือ F_{121}^{10} จะใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น F_0 ซึ่งหมายถึงเวลาเป็นนาทีที่ 121 องศาเซลเซียส หรือ 250 องศาฟาเรนไฮท์ ลงจำนวนหนึ่ง

ค่า F ยังสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F = D \log(N_0/N) = D (\log N_0 - \log N)$$

โดยที่ N_0 = จำนวนเซลล์หรือสปอร์เริ่มต้น

N = จำนวนเซลล์หรือสปอร์สุดท้ายที่เหลืออยู่

D = ค่า D ของจุลินทรีย์ที่ทำการศึกษา

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า F_0 ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นในวัตถุดิบ จำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเตรียมอาหาร คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและอุณหภูมิในการเก็บรักษา ค่า F_0 จะเปลี่ยนแปลงไปตามอาหารต่างๆ

โดยทั่วไปจะใช้แบคทีเรียที่มีความทนทานต่อความร้อนสูงกว่า C. botolinumtype A ในการกำหนดเวลาฆ่าเชื้อของอาหารกระป๋อง ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถฆ่า C. botolinum ได้ทั้งหมด

ตัวอย่าง F = D $\log(N_0/N)$

= (0.20 min) log (1 spore/10^{-12}spore)

F_0 = 0.20 (12) min = 2.40 min

ตัวอย่างนี้ก็คือการหาค่า F ที่ 12 D cook นั่นเอง ถ้าไม่แทนค่า D ก็จะได้

F = D $\log(1/10^{-12})$

= D (0+12) = 12 D

12-D cook สำหรับ C.botulinum มีค่าเวลาในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 2.40 นาทีที่ 121 องศาเซลเซียส สมมุติว่าแบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา เวลาในการฆ่าเชื้อของอาหารกระป๋องชนิดนี้เป็น C. sporogenes ที่มีค่า D_{121} =1.0 นาที และมีจำนวนเชื้อเริ่มต้น = 1,000 สปอร์ต่อกระป๋อง ต้องการฆ่าเชื้อให้เหลือ 10^{-5} สปอร์ (มีสปอร์เหลืออยู่ 1 ในทุกๆ 100,000 กระป๋อง)

ดังนั้น F = (1min) log (10^3 spore/10^{-5} spore)

= (1min) (8)

= 8 min ที่ 121 องศาเซลเซียส

ดังนั้นถ้าใช้ F = 8.0 นาที จะมี C. botulinum เหลืออยู่ดังนี้

8 = (0.2min) log(1 spore/N spore)

8min/0.2min = log(1/N)

40 = log(1/N)

10^{40} = 1/N

N = 10^{-40} spores

ตารางที่ 2.1 ค่า F_0 ของผลิตภัณฑ์อาหาร

ผลิตภัณฑ์อาหาร	ขนาดกระป๋อง	ค่า F_0
ขนมเค้ก	202*308	3-5
ถั่วในซอสมะเขือเทศ	ทุกขนาด	4-6
ถั่วลันเตาในน้ำเกลือ	307*409 หรือเล็กกว่า	6
	307*409 ถึง 603*700	6-8
แครอท	ทุกขนาด	3-4
ถั่วแขกในน้ำเกลือ	307*409 หรือเล็กกว่า	4-6
เห็ดในน้ำเกลือ	300*410	8-10
เนื้อในน้ำเกรวี่	ทุกขนาด	12-15
ไส้กรอกในน้ำมัน	300*410 และเล็กกว่า	4-6
ไส้กรอกในน้ำเกลือ	300*410 และเล็กกว่า	3-4
แกงเนื้อใส่ผัก	300*410 และเล็กกว่า	8-12

ไก่ทั้งชิ้นในน้ำเกลือ	401*411 ถึง 603*700	15-18
ปลาในซอสมะเขือเทศ	300*410 และเล็กกว่า	10
ซุปมะเขือเทศ	ทุกขนาด	3
ซุปข้าวโพด	307*409	5-6
หน่อไม่ฝรั่ง	ทุกขนาด	2-4
ข้าวโพดอ่อนในน้ำเกลือ	307*409	9

ที่มา : ดัดแปลงจาก Alstrand และ Ecklund (1952) อ้างโดย วิไล รังสาดทอง, (2546, หน้า 171)

จะเห็นได้ว่าเวลาในการฆ่าเชื้อที่ได้จากการคำนวณนี้ยอมรับได้ เพราะมากพอที่จะทำลาย C. botulinum ได้ ระดับการปนเปื้อนจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์ สำหรับกระบวนการให้ความร้อนเพื่อทำลายแบคทีเรียทนต่อความร้อนสูงซึ่งอาจทำให้เกิดการเน่าเสีย เช่น ถ้าสมมติให้มีจำนวนสปอร์เริ่มต้น 1 สปอร์/กรัม กระป๋องขนาด 20 ออนซ์จะมีสปอร์เริ่มต้น เท่ากับ 20x28.35 = 567 สปอร์ (1 ออนซ์ เท่ากับ 28.35 กรัม) จำนวนสปอร์สุดท้ายที่ต้องการควรเป็นระดับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.001 นั่นคือ ลดระดับการปนเปื้อนจาก 567 สปอร์/1,000 กระป๋อง คิดค่าเฉลี่ยสูงสุดของสปอร์ที่ทนทานต่อความร้อนสูงมีค่าประมาณ 4 ดังนั้น

$$
\begin{aligned}
F &= D \log(N_0/N) \\
&= (4 \text{ min}) \log (567/10^{-3}) \\
F_0 &= 4(5.75) \\
F_0 &= 23 \text{ min}
\end{aligned}
$$

อย่างไรก็ตามปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้น (bacterial load) ก่อนการฆ่าเชื้อก็เป็นปัจจัยสำคัญในการคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อ ฉะนั้น 12-D cook จะใช้ได้ผลหรือให้ความมั่นใจได้ต่อเมื่ออาหารกระป๋องที่จะฆ่าเชื้อมีปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นไม่สูงจนเกินไป การควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ ขั้นตอนการเตรียมอาหารให้มีสุขลักษณะที่ดีหรือหลักปฏิบัติที่ดีของโรงงานจึงเป็นสำคัญ

ค่า F เป็นความสามารถในการทำลายจุลินทรีย์ของกระบวนการ (lethality, L) และเป็นค่าที่มีความสำคัญมากในการหาประสิทธิภาพในการทำลาย (lethal effect) ของช่วงอุณหภูมิที่กำลังให้ความร้อน โดยอุณหภูมินั้นอาจยังไม่ถึงอุณหภูมิที่ต้องการและการหาประสิทธิภาพในการทำลายในช่วงที่ให้ผลิตภัณฑ์เย็นลง ค่า F ใช้ในการเปลี่ยนเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เป็นเวลาในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิอ้างอิง 121 องศาเซลเซียส นั่นคือสามารถแสดงค่า F ที่อุณหภูมิอื่นที่ไม่ใช่ 121 องศาเซลเซียส ก็ได้ เช่น การให้ความร้อนแก่อาหารที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 นาที จะมีผลในการทำลายจุลินทรีย์ที่มีค่า Z = 10 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1 นาที ที่ 121 องศาเซลเซียส

อัตราการแทรกผ่านความร้อน

1. องค์ประกอบและคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหาร

ของเหลวหรืออาหารบางชนิด อาจเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพามากกว่าการนำความร้อน อาหารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเป็นข้อกำจัดที่สำคัญในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนในอาหาร องค์ประกอบและธรรมชาติของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะปริมาณกรดหรือ pH มีผลต่อปริมาณความร้อนที่ต้องการในการฆ่าเชื้อมาก ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

1) pH ของอาหารกระป๋องเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่จะเจริญได้ และปริมาณความร้อนที่ต้องการในการฆ่าเชื้อ อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำจะต้องการความร้อนมากกว่าอาหารที่มีความเป็นกรดสูง

2) a_w แสดงปริมาณน้ำในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้หรือเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ อาหารกระป๋องส่วนใหญ่มีค่า a_w>0.98 ดังนั้นจุลินทรีย์และสปอร์จึงสามารถเจริญได้ดี a_w<0.95 เชื้อจุลินทรีย์ เช่น Staphylococcus aureus จะถูกยับยั้งและทำให้ความต้องการความร้อนในการฆ่าเชื้อน้อยลง

3) น้ำหนักบรรจุ ถ้ามากเกินไปจะทำให้อัตราการแทรกผ่านความร้อนลดลง

4) ขนาดชิ้นอาหารหรือที่เรียกว่า “cut” และการเรียงตัวของชิ้นอาหารในกระป๋อง ชิ้นอาหารขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการฆ่าเชื้อนานกว่าชิ้นอาหารขนาดเล็ก ชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะตกลงมาอัดแน่นที่ก้นกระป๋องหรืออาจเกิดการเรียงตัวตามแนวนอนหรือแนวตั้งจะมีการเคลื่อนที่ของของเหลวยากง่ายต่างกัน

5) ความข้นหนืด มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและระดับการผสมที่ช่องว่างเหนืออาหาร การใส่แป้งมากเกินไปหรือใช้แป้งผิดประเภทอาจทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งจะเกิดปัญหาการให้ความร้อนไม่เพียงพอได้

6) การดูดคืนน้ำขององค์ประกอบ สปอร์อาจจะเจริญได้ถ้าอาหารและองค์ประกอบดูดคืนน้ำได้ไม่เพียงพอในระหว่างการแปรรูป ในความร้อนแห้งสปอร์เหล่านี้จะทนต่อความร้อนได้นานกว่าในความร้อนชื้น

7) วัตถุกันเสียและสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลนทรีย์และสปอร์

8) อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่บรรจุ การบรรจุของแข็งมากเกินไปจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนช้าลง

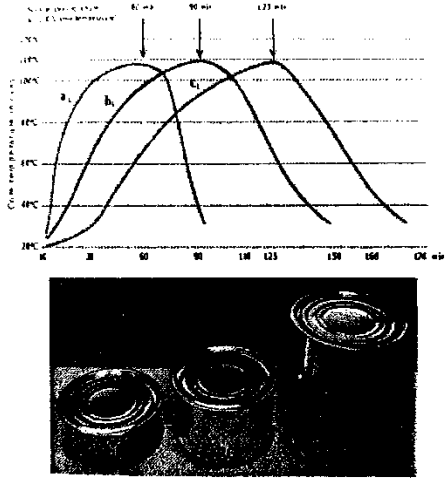
9) การเตรียมวัตถุดิบ

10) ช่องว่างเหนืออาหารในกระป๋อง ถ้าช่องว่างมีไม่เพียงพออาจจะเกิดการให้ความร้อนไม่เพียงพอได้

11) อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ

2. ขนาดของบรรจุภัณฑ์

การส่งผ่านความร้อนไปยังจุดกึ่งกลางในบรรจุภัณฑ์ขนาดเล็กจะทำได้เร็วกว่าขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การส่งผ่านความร้อนสู่จุดร้อนช้าของกระป๋องขนาดแตกต่างกัน
ที่มา : Food and Agriculture Organization of the United Nation (2014)

3. การหมุนกระป๋องในแกนนอนหรือแกนตั้ง

จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการพาความร้อนเพิ่มอัตราการแทรกผ่านความร้อนในอาหารที่มีความหนืดหรืออาหารกึ่งแข็ง

4. อุณหภูมิของการฆ่าเชื้อ

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอาหารและตัวกลางให้ความร้อนที่สูงกว่าจะให้การแทรกผ่านความร้อนที่เร็วกว่า

5. รูปร่างของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะสูงจะส่งเสริมให้เกิดการพาความร้อนดีขึ้นในอาหารที่ได้รับความร้อนแบบการพา

6. ชนิดของบรรจุภัณฑ์

การส่งผ่านความร้อนโลหะจะเร็วกว่าผ่านแก้วหรือพลาสติกเนื่องจาความแตกต่างเรื่องสมบัติการนำความร้อน

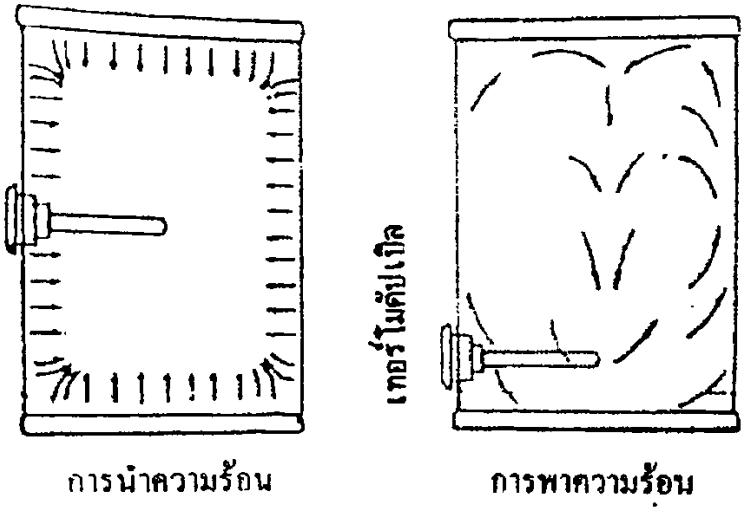
นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น การเรียงกระป๋องในเครื่องฆ่าเชื้อ วิธีการทำให้เย็น อุณหภูมิและความดันอากาศหรือน้ำเย็น ตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิในกระป๋อง รดูแลกระป๋องหลังการปิดฝาแล้ว เวลาที่ใช้เมื่อเครื่องฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนด หรือ “CUT” (come up time) การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฆ่าเชื้อ ตำแหน่งของกระป๋องในเครื่องฆ่าเชื้อ

อัตราเร็วที่ปริมาณความร้อนแทรกผ่านไปยังจุดที่ร้อนช้าที่สุด (cold piont) ของอาหารกระป๋องขึ้นกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของอาหารนั้นๆ การถ่ายเทความร้อนในอาหารจะซับซ้อนและมีผลต่อระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ ดังนั้นการแบ่งประเภทของอาหารตามลักษณะความร้อนจะช่วยในการพิจารณาได้ดังนี้

1) อาหารที่ถ่ายเทความร้อนแบบการนำ (conductive heating packs) ความร้อนจะถูกถ่ายเทในทุกทิศทางผ่านผนังกระป๋อง แล้วผ่านโมเลกุลของอาหารที่ไม่เคลื่อนที่ จุดร้อนช้าที่สุดจะอยู่ที่กึ่งกลางกระป๋อง ดังแสดงในภาพที่ 2.4

2) อาหารที่ถ่ายเทความร้อนแบบการพา (convective heating packs) ความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยโมเลกุลของอาหารจะเคลื่อนที่ไปด้วย เช่นอาหารที่มีความข้นหนืดต่ำหรือผลิตภัณฑ์ที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กในน้ำเกลือ เมื่อได้รับความร้อนส่วนที่เป็นของเหลวจะได้รับความร้อนก่อนและเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน เนื่องจากความหนาแน่นน้อยลง ในขณะที่ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนที่ลงข้างล่าง ทำให้เกิดการหมุนเวียนของอาหารภายในกระป๋อง จุดร้อนช้าที่สุดจะอยู่ที่ประมาณ ¾ นิ้วจากด้านล่าง สำหรับกระป๋องขนาดเล็ก ถ้าเป็นกระป๋องขนาดใหญ่จุดร้อนช้าที่สุดจะอยู่ที่ประมาณ $1^1/_2$ นิ้วจากด้านล่างของกระป๋อง

3) อาหารที่ถ่ายเทความร้อนแบบผสม (complex heating packs) เช่น อาหารที่มีส่วนผสมของสารให้ความข้นหนืด โดยในช่วงแรกจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาและเมื่อได้ความร้อนต่อไปอาหารจะข้นหนืดขึ้นและการถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนเป็นการแบบการนำจุดที่ความร้อนเข้าไปถึงช้าที่สุดจะอยู่ระหว่างจุดร้อนช้าที่สุดในอาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำและจุดร้อนช้าที่สุดของอาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพา



ภาพที่ 2.4 การวัดจุดที่ร้อนช้าที่สุดในอาหารกระป๋องที่บรรจุอาหารแข็งและเหลว
ที่มา : วิไล รังสาดทอง (2546, หน้า 175)

การคำนวณเวลาการให้ความร้อน

ในการกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ถูกต้องในการฆ่าเชื้อนั้น จำเป็นต้องได้รับข้อมูลการให้ความร้อนหรือการทำให้อาหารเย็นลงในภาชนะบรรจุที่ถูกต้องและเที่ยงตรงด้วยการแทรกผ่านความร้อนที่เป็นข้อมูลที่ได้จากเส้นกราฟแทรกผ่านความร้อนและเส้นกราฟการทำให้เย็น ลักษณะของเส้นกราฟแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ พารามิเตอร์ที่ได้จากการพลอทข้อมูลแตกต่างกัน ขึ้นกับวิธีการพลอทและการแปลข้อมูล

การคำนวณการให้ความร้อนมีหลายวิธี เช่น วิธีการใช้สูตร วิธีการใช้กราฟหรือวิธีทั่วไป และวิธีการใช้โมโนแกรม วิธีการใช้กราฟเป็นวิธีที่ใช้ในการวัดค่าการฆ่าเชื้อหรือ F_0 ของกระบวนการเมื่อสภาวะในการฆ่าเชื้อต่างไปจากสภาวะที่ใช้ในการคำนวณเดิม เช่น CUT เวลาในการหล่อเย็น หรือระยะเวลาที่คงการให้ความร้อนไว้ก่อนการทำเย็น วิธารใช้กราฟยังใช้ได้กับกรณีเส้นกราฟการแทรกผ่านความร้อน 2 เส้น เมื่อพลอทบนกระดาษเซมิล็อก แต่ไม่สามารถใช้ข้อมูลที่ได้มาคำนวณกระบวนการฆ่าเชื้อที่ใช้อุณหภูมิของรีทอร์ทหรืออุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารแตกต่างไปได้ การใช้กราฟนอกจากจะต้องบันทึกเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนแล้ว จะต้องบันทึกเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการทำเย็นด้วย อย่างไรก็ตามไม่สามารถใช้วิธีการพลอทกราฟกับผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เย็นด้วยลมเย็นได้

วิธีการใช้สูตรใช้ได้กับข้อมูลที่เมื่อพลอทแล้วให้เส้นกราฟการแทรกผ่านความร้อนไม่เกิน 2 เส้น การใช้สูตรช่วยให้สามารถประเมินกระบวนการฆ่าเชื้อที่ใช้อุณหภูมิของรีทอร์ทและอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารต่างไปจากข้อมูลการให้ความร้อนเดิม สามารถนำปัจจัยต่างๆจากการเขียนกราฟการแทรกผ่านความร้อนไปใช้กับกระป๋องที่มีขนาดบรรจุต่างกันได้ถ้าเส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงเส้นเดียวบนกระดาษเซมิล็อก

1) วิธีการใช้สูตร

วิธารใช้สูตรทำให้สามารถคำนวณเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิของรีทอร์ทในบรรจุภัณฑ์ขนาดแตกต่างกันได้โดยใช้สมมติฐานที่ตั้งขึ้นจากลักษณะของกระบวนการให้ความร้อนโดยวิธารเตรียมกราฟทำได้ดังต่อไปนี้

1.1 การเตรียมเส้นกราฟการแทรกผ่านความร้อน (heat penetration curve)

วัตถุประสงค์ของการเขียนกราฟการแทรกผ่านความร้อนคือการหาค่า f_h และ j โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$\text{Log}(RT\text{-}CT) = t/f_h + \log(j(RT\text{-}IT))$$

ขณะที่ RT คือ อุณหภูมิรีทอร์ท (^{0}F)

CT คือ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าที่สุดของอาหารกระป๋อง (^{0}F)

f_h คือ เวลาเป็นนาทีที่ทำให้กราฟการแทรกผ่านความร้อนส่วนที่เป็นเส้นตรงเปลี่ยนไป 1 วงจรล็อกหรือ 90 เปอร์เซ็นต์

T คือ เวลา (นาที)

IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋อง (^{0}F)

j คือ ค่าคงที่

เมื่อพลอทค่าระหว่าง Log(RT-CT) กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-1/f_h$ ซึ่งเป็นเวลาที่เส้นกราฟการแทรกผ่านความร้อนเปลี่ยนแปลงไป 1 วงจรล็อก f_h เป็นค่าที่บอกว่าอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุดเพิ่มขึ้นเร็วแค่ไหน จะเห็นได้ว่า f_h เป็นส่วนกลับของ slope ยิ่ง f_h มีค่ามากยิ่งต้องใช้เวลามากขึ้นในการทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น

ในการทดสอบการแทรกผ่านความร้อนนั้น ต้องการช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้เครื่องฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (CUT) โดยทั่วไปคิดว่า 42 เปอร์เซ็นต์ของ CUT จะมีผลต่อการทำลายแบคทีเรีย

หมายความว่าเวลาที่เริ่มให้ผลในการฆ่าเชื้อจริง ไม่ใช่เวลาที่เครื่องฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ต้องการ แต่จะเริ่มตั้งแต่เวลาที่ 58 เปอร์เซ็นต์หรือ 0.58 ของเวลา CUT หลังจากเปิดไอน้ำ ถ้า CUT = 10 นาที ดังนั้นเวลาที่เริ่มในการฆ่าเชื้อจะเท่ากับ 0.58(10 นาที) = 5.8 นาที นั่นคือนับเวลาในการฆ่าเชื้อจากจุด 5.8 นาที หลังจากเปิดไปน้ำ ไม่ใช่ 10 นาทีหลังจากเปิดไอน้ำ

สเกลของอุณหภูมิ

เพื่อความสะดวกในการพลอทค่า CT โดยตรงโดยการกลับหัวระดาษกราฟเซมิล็อก และให้ใส่ค่าบนบรรทัดสุดท้ายของวงจรล็อกด้วย RT-1 และวงจรต่อมาด้วย RT-10 และวงจรสุดท้ายด้วย RT-100 ตามลำดับ การพลอทกราฟด้วย 3 สเกลล็อกก็สามารถครอบคลุมข้อมูลได้

สเกลเวลา

โดยทั่วไปจะแบ่งสเกลให้ง่ายที่สุด โดยใช้เป็นเลขจำนวนเต็ม เวลา 0 หมายถึง เวลาเริ่มเปิดไอน้ำ

1.2 การเขียนกราฟข้อมูล

หลังจากที่กลับหัวท้ายกระดาษเซมิล็อกแล้วให้พลอทค่าอุณหภูมิของกระป๋องบนสเกลล็อกหรือแกน y ส่วนแกน x ให้แบ่งสเกลโดยเริ่มจาก 0 ไปจนถึง เวลาที่สิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อ ให้ลากเส้นตรงผ่านข้อมูลที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส ขึ้น ทั้งนี้ควรลากเส้นให้ผ่านข้อมูลทั้งหมดมากกว่าจะใช้วิธีการเฉลี่ยและลากเส้นตรงเส้นเดียว อย่างไรก็ตามในช่วงแรกของเส้นกราฟจะไม่เป็นเส้นตรง แต่จะโค้งมากน้อยเพียงใดแล้วแต่แบบของการถ่ายเทความร้อนและส่วนหลังจะเป็นเส้นตรง ส่วนที่โค้งนั้นขึ้นนับสมบัติของอาหารนั้นๆ ว่าสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วช้าเพียงใด ถ้าถ่ายเทได้ช้าเช่นแบบการนำความร้อน เราจะพบว่าส่วนโค้งนี้จะกว้างหรือกางออก ถ้าอาหารสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วแบบการพาความร้อน ส่วนที่เป็นเส้นโค้งนี้จะสั้น เวลาที่ใช้จากเริ่มต้นจนถึงเมื่อเราเห็นกราฟเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระป๋องนี้เรียกว่า lag time ในบางกรณีเราอาจจะพบว่าอาหารนั้นมีเส้นกราฟการให้ความร้อนส่วนที่เป็นเส้นตรงมากกว่า 1 เส้น ซึ่งจะเรียกว่า “broken heating curve” ตัวอย่างอาหารที่ให้เส้นกราฟแบบนี้คืออาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบผสมในกรณีของเส้นกราฟเส้นเดียวนั้น จะให้ค่า 2 ค่า เพื่อใช้ในการคำนวณคือ j(lag factor) ค่า f_h และค่า corrected zero (CZ) หลังจากกำหนด CZ แล้วให้ลากเส้นตรงจากจุดที่ CZ ตัดกับเส้นกราฟขนานกับแกนเวลาไปยังแกนอุณหภูมิ จุดที่ตัดกันกับแกนอุณหภูมิคือ อุณหภูมิ “jI”

$$I = RT - IT$$

โดยที่ IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่จุดร้อนช้าที่สุดของกระป๋อง RT คือ อุณหภูมิของรีทอร์ท ดังนั้น I คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของรีทอร์ทกับอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋องก่อนเปิดไอน้ำ

$$j = jI/I$$

ค่า j คือ ค่าคงที่สำหรับผลิตภัณฑ์ แม้จะเปลี่ยนขนาดกระป๋องก็ตาม

ค่าที่ใช้ในการคำนวณอีกค่า คือ ค่า f_h หมายถึงเวลาเป็นนาทีที่ทำให้กราฟการแทรกผ่านความร้อนส่วนที่เป็นเส้นตรงเปลี่ยนแปลงไป 1 วงจรล็อก หรือ 90 เปอร์เซ็นต์จากค่า j และ f_h ที่ได้จากกราฟการแทรกผ่านความร้อน ทำให้สามรถคำนวณการฆ่าเชื้อ (F_0) หรือเวลาในการฆ่าเชื้อของกระบวนการได้ โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{Log } g = \log jI - (B_b/f_h)$$

$$F_0 = \frac{f_h}{(f_h/U)Fi}$$

โดยที่ค่า f_h ได้จากการพลอทกรฟา ส่วน B_B คือเวลาการฆ่าเชื้อเป็นค่าที่กำหนด IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารซึ่งควรเป็นอุณหภูมิเดียวกันกับสภาวะการผลิตจริง เมื่อแทนค่าต่างๆในสมการแล้ว จะได้ค่า log g ค่า g คือ จำนวนอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิรีทอร์ทที่จุดร้อนช้าที่สุดในกระป๋อง ณ ที่จุดสิ้นสุดกระบวนการ หากจะคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อหรือ processing time สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$F_h/U = \frac{f_h}{(f_0)Fi}$$

$$B_B = F_h (\log jI - \log g)$$

F_h นั้น ได้จากกราฟการแทรกผ่านความร้อน F_0 เป็นค่าการฆ่าเชื้อที่ต้องการ ส่วน Fi ได้จากการเปิดตารางที่ 2.2 เมื่อคำนวณค่า f_h/U ได้ จะทำให้สามารถหาค่า log g ที่สัมพันธ์กันจากตารางที่ 2.3 ได้ เมื่อแทนค่า log g และ f_h และ j ซึ่งได้จากราฟแล้ว จะได้เวลาในการฆ่าเชื้อหรือ B_B เป็นนาที

ตารางที่ 2.2 ค่า Fi ที่อุณหภูมิรีทอร์ทต่างๆ (Z=18 °F อุณหภูมิอ้างอิง 250 °F)

RT	F_i	RT	F_i	RT	F_i
214	100.00	233	8.799	252	0.7743
215	87.99	234	7.743	253	0.6813
216	77.43	235	6.814	254	0.5995
217	68.13	236	5.995	255	0.5275
218	59.92	237	5.275	256	0.4642

219	52.75	238	4.642	257	0.4085
220	46.42	239	4.085	258	0.3594
221	40.85	240	3.594	259	0.3163
222	35.94	241	3.163	260	0.2783
223	31.63	242	2.783	261	0.2449
224	27.83	243	2.449	262	0.2154
225	24.48	244	2.154	263	0.1896
226	21.54	245	1.896	264	0.1668
227	18.96	246	1.668	265	0.1468
228	16.68	247	1.468	266	0.1292
229	14.68	248	1.292	267	0.1136
230	12.92	249	1.136	268	0.1000
231	11.36	250	1.000	269	0.0880
232	10.00	251	0.8799	270	0.0774

ที่มา : American can company อ้างโดย วิไล รังสาดทอง (2546, หน้า 186)

ตารางที่ 2.3 ค่า f_h/U สำหรับ log g (Z=18 °F)

Log g	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-2.00	0.369	0.368	0.366	0.365	0.364	0.362	0.361	0.360	0.358	0.357
-1.80	0.398	0.397	0.395	0.394	0.392	0.391	0.386	0.388	0.386	0.385
-1.70	0.415	0.413	0.412	0.410	0.408	0.407	0.405	0.4003	0.402	0.400
-1.60	0.433	0.431	0.429	0.427	0.426	0.424	0.422	0.420	0.418	0.417
-1.50	0.452	0.450	0.448	0.446	0.444	0.442	0.441	0.439	0.437	0.435
-1.40	0.474	0.472	0.469	0.467	0.465	0.463	0.461	0.459	0.457	0.455
-1.20	0.524	0.521	0.518	0.515	0.513	0.510	0.508	0.505	0.503	0.500
-1.10	0.552	0.549	0.546	0.543	0.543	0.538	0.535	0.532	0.529	0.526
-1.00	0.585	0.581	0.578	0.575	0.571	0.568	0.565	0.562	0.559	0.556
-0.90	0.623	0.618	0.614	0.609	0.604	0.599	0.599	0.595	0.592	0.588
-0.80	0.670	0.665	0.660	0.656	0.651	0.642	0.642	0.637	0.633	0.628
-0.70	0.717	0.712	0.708	0.703	0.698	0.689	0.689	0.684	0.679	0.674

-0.60	0.769	0.763	0.758	0.753	0.747	0.737	0.737	0.732	0.727	0.722
-0.50	0.827	0.820	0.814	0.808	0.802	0.797	0.791	0.785	0.780	0.774
-0.40	0.894	0.887	0.880	0.873	0.866	0.859	0.852	0.846	0.839	0.833
-0.30	0.974	0.966	0.957	0.949	0.940	0.932	0.924	0.917	0.909	0.901
-0.20	1.071	1.060	1.050	1.040	1.030	1.020	1.011	1.001	0.992	0.983
-0.10	1.187	1.175	1.162	1.150	1.138	1.126	1.115	1.103	1.092	1.081
-0.00		1.314	1.299	1.284	1.269	1.255	1.241	1.227	1.214	1.200
0.00	1.330	1.346	1.362	1.379	1.396	1.413	1.431	1.449	1.468	1.487
0.10	1.506	1.526	1.546	1.567	1.588	1.610	1.632	1.654	1.678	1.701
0.20	1.726	1.751	1.776	1.803	1.829	1.857	1.885	1.914	1.944	1.974
0.30	2.005	2.037	2.070	2.104	2.139	2.174	2.211	2.248	2.287	2.327
0.40	2.368	2.410	2.454	2.498	2.544	2.592	2.640	2.691	2.743	2.796
0.50	2.852	2.909	2.968	3.029	3.092	3.157	3.224	3.294	3.366	3.441
0.60	3.519	3.599	3.682	3.768	3.858	3.951	4.048	4.148	4.252	4.361
0.70	4.474	4.591	4.714	4.842	4.975	5.113	5.258	5.410	5.568	5.733
0.80	5.906	6.087	6.276	6.474	6.682	6.901	7.130	7.370	7.623	7.889
0.90	8.168	8.463	8.773	9.100	9.445	9.809	10.194	10.600	11.031	11.486
1.00	11.969	12.481	13.024	13.601	14.213	14.865	15.560	16.299	17.088	17.929
1.10	18.828	19.789	20.817	21.919	23.100	24.367	25.729	27.192	28.767	30.465
1.20	32.295	34.271	36.407	38.718	41.221	43.935	46.881	50.083	53.568	57.364
1.30	61.505	66.028	70.974	76.389	82.326	88.843	96.008	103.895	112.589	122.187
1.40	132.8	144.5	157.6	172.0	188.1	206.0	226.0	248.4	273.4	301.4
1.50	332.9	368.3	408.2	453.3	504.3	562.0	627.6	702.2	787.1	884.2

ที่มา : วิไล รังสาดทอง (2545, หน้า 185)

2) วิธีทั่วไปหรือวิธีการใช้กราฟ

การใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันอาจให้ค่าอัตราการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เท่ากันได้ สามารุแสดงกราฟ TDT หรือเวลาในการทำลายจุลินทรีย์ ในรูปสมการต่อไปนี้

$TDT = 10^{(121 - CT)/Z}$ หรือ $10^{(250 - CT)/Z}$

ขณะที่ CT คืออุณหภูมิของกระป๋องที่จุดร้อนช้าที่สุด เช่น ถ้าให้ความร้อนอาหาร 239 องศาฟาเรนไฮท์ และเชื้อจุลินทรีย์ที่ทนทานความร้อนสูงสุดมีค่า Z = 18 องศาฟาเรนไฮท์

$TDT = 10^{(250 - 239)/18}$

= 3.9 นาที

หมายความว่าความสารถในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อน 239 องศาฟาเรนไฮท์ เป็นเวลา 3.9 นาที เท่ากับการทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน 250 องศาฟาเรนไฮท์ เป็นเวลา 1 นาที ส่วนอัตราการทำลายจะเป็นส่วนกลับของ TDT หรือมีผลเป็นหน่วยความปลอดเชื้อ ที่จุลินทรีย์ ได้รับความร้อนในเวลา 1 นาที ณ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนเทียบได้กับเวลาในการให้ความร้อนที่ 250 องศาฟาเรนไฮท์ เป็นเวลากี่นาที หรือคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{อัตราการทำลาย} = \frac{F_{250}^{Z}}{F_{T}^{Z}} = 10^{(CT-250)/Z}$$

เนื่องจากอัตราการทำลายเชื้อขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และค่า Z ของจุลินทรีย์ ซึ่งมีผลต่อกระบวนการให้ความร้อน จากข้อมูลการแทรกผ่านความร้อน เราสามารถคำนวณหาอัตราการทำลายแล้วนำไปพลอทกราฟกับเวลา การคำนวณค่า F_0 สะสมทำได้โดยการอินทิเกรดพื้นที่ใต้กราฟ

บทสรุป

เพื่อทำลายจุลินทรีย์ รวมทั้งสปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและสปอร์ส่วนใหญ่ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย ปริมาณความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะอยู่ในระดับที่เรียกว่า การฆ่าเชื้อเชิงการค้า (commercial sterilization) เนื่องจากมิได้ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดแบบที่ใช้ในการฆ่าเชื้อทางการแพทย์ อาหารที่ผ่านการแปรรูปในระดับการฆ่าเชื้อเชิงการค้าอาจยังมีสปอร์ของแบคทีเรียทนร้อน (thermophiles) หลงเหลืออยู่ แต่ไม่เป็นปัญหาเนื่องจากอาหารถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส สปอร์ของแบคทีเรียทนร้อนจึงไม่งอกและเพิ่มจำนวนทำให้อาหารเน่าเสียในการฆ่าเชื้อหลังการบรรจุซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมสามารถทำได้ เครื่องจักรส่วนใหญ่ผลิตได้ในประเทศจึงทำให้ต้นทุนไม่สูงมากนัก ตัวอย่างเช่นการผลิตน้ำผลไม้สเตอริไลซ์

เอกสารอ้างอิง

วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นอล พับลิเคชั่น: กรุงเทพมหานคร.

Food and Agriculture Organization of the United Nation. Canning Sterilization of meat products. Retrieved September 23, 2014, from : http://www.fao.org/docrep/010/ai407e/ai407e22.html.

Singh, R. P. and Heldman, D. R. 2001. Introduction to Food Engineering (3rd, Eds.). Academic Press, New York.

Singh, R. P. and Heldman, D. R. 2014. Introduction to Food Engineering (5rd, Eds.). Academic Press, New York.

Gustavo, V.B.C. (2003). Unit Operation in Food Engineering. CRC Press, New York.