บทที่ 7
จลนพลศาสตร์การลดปริมาณการปนเปื้อนของจุลินทรีย์

สารอาหารที่ใช้เป็นวัตถุดิบหรืออากาศที่ต้องใช้ในกระบวนการทางชีวภาพนั้น จำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่ทำให้สารอาหารและอากาศนั้นปราศจากจุลินทรีย์ปนเปื้อนเสียก่อน วิธีการที่ทำให้สารอาหารปราศจากจุลินทรีย์ปนเปื้อนมีหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมี เช่น การเติมสารต่อต้านแบคทีเรีย หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน การกรอง การใช้รังสี เป็นต้น ในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นั้น การทำลายเชื้อปนเปื้อนด้วยความร้อนเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ส่วนการทำให้อากาศปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ มักนิยมการกรองมากกว่า ในกรณีที่ต้องการศึกษาถึงวิธีการออกแบบและการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ทำลายจุลินทรีย์ จำเป็นต้องเข้าใจลักษณะและกลไกที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อลักษณะการลดลงของจุลินทรีย์ หรือจลนพลศาสตร์การตายของจุลินทรีย์นั้นก่อน

จลนพลศาสตร์การตายของเซลล์จุลินทรีย์ (Kinetics of Death)

การตายของเซลล์จุลินทรีย์ หมายถึง การสูญเสียความสามารถในการเจริญและการแบ่งตัว เมื่อจุลินทรีย์ถูกทำลายด้วยวิธีทางกายภาพหรือวิธีทางเคมี จุลินทรีย์จะไม่ตายทันที แต่จะค่อยๆลดปริมาณลง โดยปฏิกิริยาการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ มักเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) ดังนี้

$$\frac{dN}{dt} = -k_d N \qquad \text{สมการที่ 75}$$

เมื่ออินทิเกรต สมการที่ 75 จะได้

$$\int_{N_o}^{N_t} \frac{-dN}{N} = \int_{t_o}^{t} k_d \, dt$$

เมื่อ k_d เป็นอัตราคงที่ของการตาย (specific death rate)

N_o เป็นจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่เริ่มต้น

N_t เป็นจำนวนจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ ที่เวลา t

t เป็นเวลา

$$\ln \frac{N_t}{N_o} = - k_d \, dt$$

จากสมการของอาร์เรเนียส

$$k_d = A \exp(-E/RT)$$

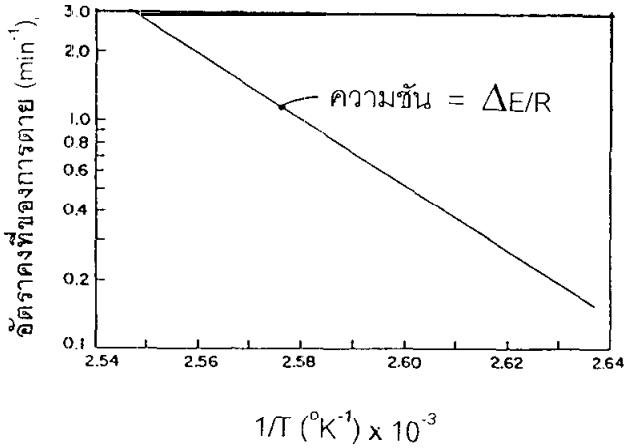
หรือ $$\log k_d = \log A - (E/2.303\,RT)$$

เมื่อ A เป็นค่าคงที่ของอาร์เรเนียส

E เป็นพลังงานกระตุ้น

T เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์

R เป็นค่าคงที่ของกาซ



รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราคงที่ของการตาย

ตารางที่ 25 แสดงค่าคงที่ของพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่ของอาร์เรเนียส

ชนิดของจุลินทรีย์	พลังงานกระตุ้น (kcal/mol)	ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส (min^{-1})
6. *stearothermophilus* (FS 1518)	67.48	4.93×10^{37}
6. *subtilis* (FS 5230)	68.7	9.50×10^{37}
Cl. sporogenes (PA 3679)	68.7	1.66×10^{38}
Vegetative cells	20 max	1.20×10^{21}

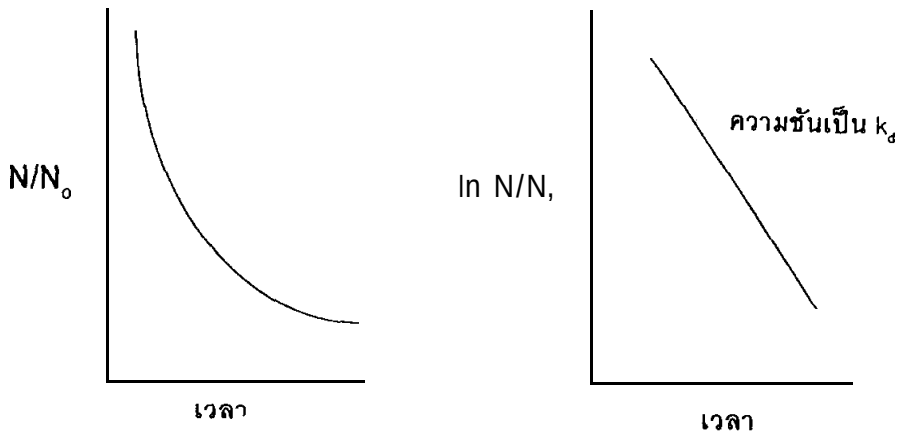
$$\ln \frac{N_t}{N_o} = -A \int_{t_o}^{t} \exp(-E/RT)\, dt$$ สมการที่ 76

เมื่ออุณหภูมิคงที่ $$\ln \frac{N_t}{N_o} = -k_d\, t$$ สมการที่ 77

หรือ $$\frac{N_t}{N_o} = e^{-kd\,t}$$

$$N_t = N_o e^{-kd\,t}$$

เทอม ln (N_o/N_t) เรียกว่าค่า Sterility หรือ Lethality ใช้สัญญลักษณ์ ∇(Nebla หรือ Del-factor) เมื่อนำสัดส่วนจำนวนของจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ต่อจำนวนจุลินทรีย์ตั้งต้น (N_t/N_o) มาสร้างกราฟบนสเกลลอการิทึมกับเวลาแล้ว จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงที่เรียกว่า one-hit curve และความชันของกราฟเป็น $-k_d$ ดังแสดงในรูปที่ 39



รูปที่ 39 แสดงอัตราการตายของเซลล์จุลินทรีย์แบบลอการิทึม

นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการตายของเซลล์จุลินทรีย์ที่มีลักษณะโค้งในช่วงต้น หรือที่เรียกว่า multiple-hit curve ซึ่งมักจะพบในกรณีของการทำลายจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาพของสปอร์ ซึ่ง Prokop และ Humphrey ได้แสดงไว้ดังนี้

$$N_R \longrightarrow N_S \longrightarrow N_D$$

เมื่อ N_R เป็นจำนวนของจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อน

N_S เป็นจำนวนของจุลินทรีย์ที่ไวต่อความร้อน

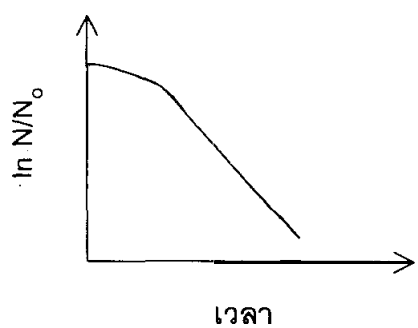
N_D เป็นจำนวนของจุลินทรีย์ที่ถูกทำลายด้วยความร้อน

ดังนั้น

$$\frac{dN_R}{dt} = -k_R N_R$$

$$\frac{dN_S}{dt} = k_R N_R - k_S N_S$$

$$\frac{N_t}{N_o} = \frac{k_R}{k_R - k_S}\left(\exp(k_S t) - \frac{k_S}{k_R}\exp(-k_R t)\right)$$



รูปที่ 40 แสดงอัตราการตายที่มีลักษณะโค้งในช่วงต้น

ปัจจัยและสภาวะที่มีผลต่ออัตราการยับยั้ง หรือการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ โดยวิธีทางกายภาพหรือวิธีทางเคมี

1. จำนวนของจุลินทรีย์เริ่มต้น

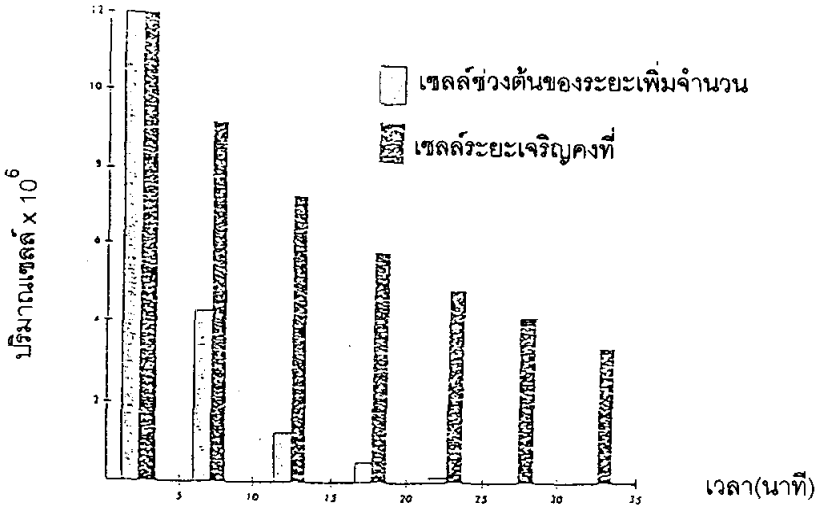
ความสามารถในการทำลายจุลินทรีย์ โดยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี ขึ้นกับจำนวนของจุลินทรีย์เริ่มต้น ถ้ามีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก หรือจุลินทรีย์อยู่กันอย่างหนาแน่นแล้วจะมีผลต่อการแทรกซึมของสารต้านจุลินทรีย์หรือความร้อน ทำให้ต้องใช้เวลาที่นานยิ่งขึ้นในการทำลายจุลินทรีย์ที่มีทั้งหมด

2. ชนิดและอายุของจุลินทรีย์

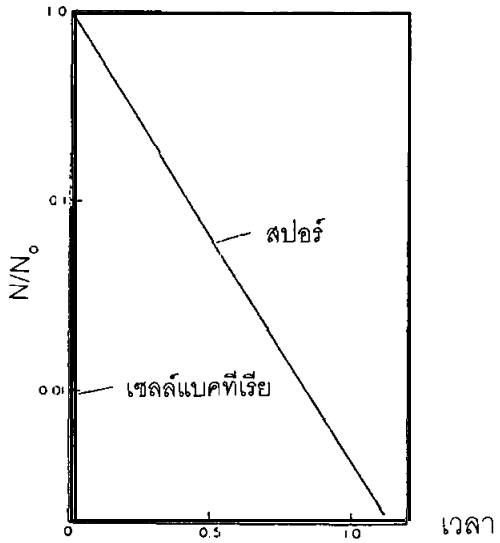
จุลินทรีย์ชนิดต่างๆมีความสามารถต่อการทนต่อการถูกทำลายด้วยวิธีทางกายภาพหรือวิธีทางเคมีที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์เหล่านั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน แต่ระยะของการเจริญที่ต่างกันสามารถมีผลต่อการถูกทำลายได้แตกต่างกัน โดยปกติแล้วเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในระยะคงที่จะมีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าระยะเพิ่มจำนวน ดังแสดงในรูปที่ 41 และจุลินทรีย์ในสภาพที่กำลังเจริญจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าสภาพที่เป็นสปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 42

ตารางที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการถูกทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนชื้น

	ความสัมพันธ์ของความต้านทาน
Vegetative bacteria and yeast	1.0
Bacterial spores	3×10^6
Mold spores	2-10
Virus and bacteriophage	I - 5



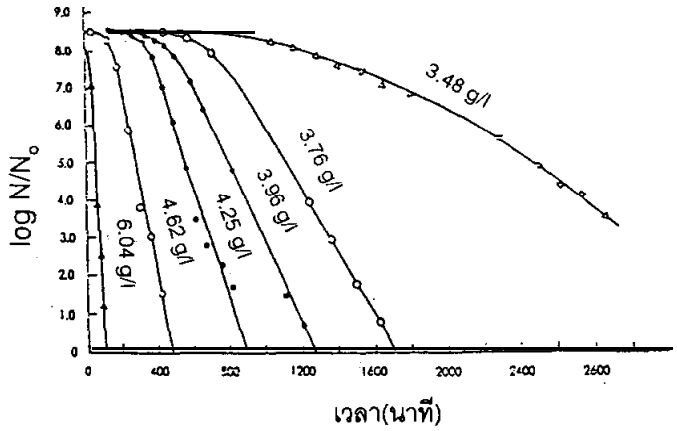
รูปที่ 41 แสดงเวลาที่ใช้ในการทำลายของแบคทีเรียที่อยู่ในระยะคงที่กับระยะเพิ่มจำนวน



รูปที่ 42 แสดงอัตราการทำลายของแบคทีเรียในสภาพที่กำลังเจริญเทียบกับสภาพที่เป็นสปอร์

3. ความเข้มของรังสี หรือความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์

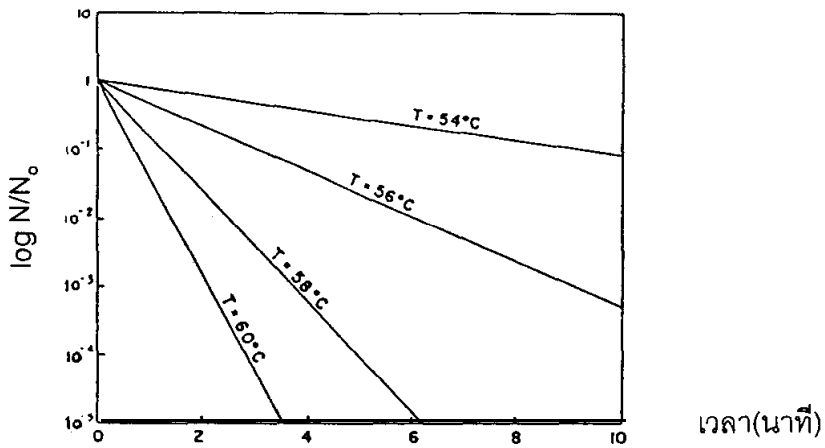
ความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์ จะมีผลต่อการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ได้เร็วขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของรังสีหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมี ดังแสดงในรูปที่ 43



รูปที่ 43 แสดงผลของการเพิ่มความเข้มข้นของฟีนอลที่มีต่อการทำลาย *E. coli* ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดลงหรือการตายของจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆนั้น มักแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของจุลินทรีย์ที่รอดในเทอมลอการิทึมที่เวลาต่างๆ หรือเรียกว่ากราฟแสดงการมีชีวิตรอด (survivor curve) หรือกราฟอัตราการตาย (death rate curve) ดังแสดงในรูปที่ 44



รูปที่ 44 แสดงผลการเพิ่มอุณหภูมิต่อการทำลาย *E.coli*

การทนต่อความร้อนหรือการต้านทานของจุลินทรีย์ต่อความร้อน

ความต้านทานของจุลินทรีย์ต่อความร้อน อาจกำหนดในรูปของเวลาเป็นนาที (thermal death time, TDT) หรือใช้อักษร F แทน โดยเวลาดังกล่าวเป็นเวลาที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์จำนวนหนึ่งได้ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ส่วน decimal reduction time (DRT) หรือใช้อักษร D แทน หมายถึง เวลาเป็นนาทีที่ใช้ลดปริมาณจุลินทรีย์ลง 90% ของปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่เริ่มต้นที่อุณหภูมินั้น

ดังนั้น $N_t = 0.1\,N$ ที่อุณหภูมิคงที่ ในเวลา D_T

หรือ $\log \frac{N_o}{0.1\,N_o} = k_T\,D_T$ สมการที่ 78

$$\log 10 = k_T\,D_T$$

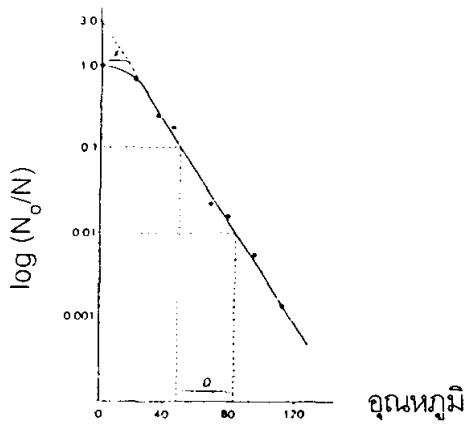
$$D_T = \frac{1}{k_T}$$

หรือ $F_T = (SV)\,(D_T)$

เมื่อ SV เป็นค่าการทำลายเชื้อ (sterilizing value)

F_T เป็นเวลาที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ (T) คงที่

D_T เป็นเวลาที่ใช้ลดปริมาณจุลินทรีย์ลง 90% ที่อุณหภูมิ (T) คงที่



รูปที่ 45 แสดงค่า D ของ *B. substilis* MD2

ตารางที่ 27 แสดงค่า $k_{121\,C}$ และ D_{121C} ของสปอร์จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

	k_{121C} (min^{-1})	D_{121C} (min)
Bacillus substilis FS *5230*	*2.6 – 3.8*	*0.6 – 0.9*
Bacillus stearothermophilus FS 1518	*0.77*	*3*
Bacillus *stearothermophilus* FS 617	2.9	*0.8*
Clostridium sporogenes PA 3679	*1.8*	*1.3*

จุลินทรีย์แต่ละชนิดต่างมีค่า D ที่ไม่เท่ากัน ค่า D ยิ่งมีค่ามาก ยิ่งยากต่อการทำลายมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการกำหนดระยะเวลาในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน จึงนิยมเลือกจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อนได้มากที่สุดในการทดสอบ นอกจากนั้นยังมีค่า Z ซึ่งเป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้ค่า D เปลี่ยนแปลงไป 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 46

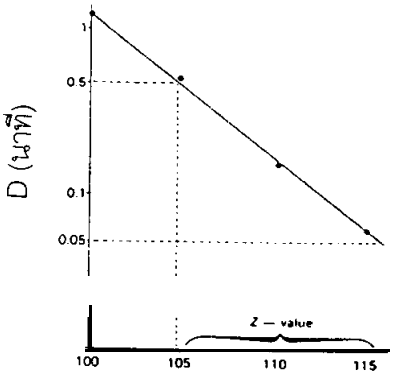
$$\frac{F_{250}}{F_T} = \frac{k_T}{k_{250}} = \frac{D_{250}}{D_T}$$

$$Q_{10} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$Z = \frac{18}{\log Q_{10}}$$

เมื่อ Q_{10} เป็นอัตราส่วนของ k_d ของจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 10 องศาเซลเซียส

หรือ $$Q_{10} = \frac{k_{d(T+10C)}}{k_{d(T)}}$$



อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 46 แสดงค่า Z ของสปอร์ *B. substilis*

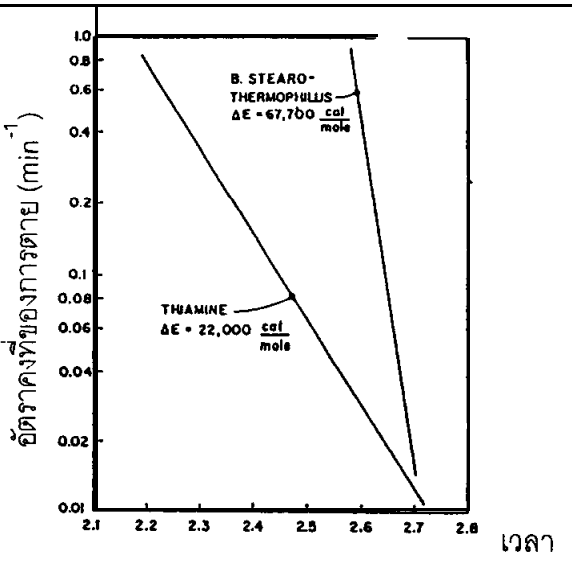
ดังนั้น ค่า F D และ Z จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้ทราบถึงความต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ โดยการบ่งชี้และกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ให้ได้ในปริมาณที่ต้องการได้

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า อัตราการตายของจุลินทรีย์จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นการกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงมีผลต่อการทำลายจุลินทรีย์ที่ต้องการ ตลอดจนคุณค่าของสารอาหารที่มีแตกต่างกันด้วย จากหลักการดังกล่าวจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมนม เป็นต้น โดยระบบที่ผ่านการทำลายเชื้อแบบพาสเจอไรเซชัน (Pasteurization) จะหมายถึงกระบวนการที่มีการให้ความร้อนโดยการควบคุมช่วงอุณหภูมิคงที่ที่ 61.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ถ้าการควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 71.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 วินาที จะเรียกว่า High temperature shot time (H.T.S.T) ในขณะที่ระบบ Ultra Heat Treatment (U.H.T) จะเป็นกระบวนการที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 132 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 วินาที การใช้หลักการดังกล่าวในการทำลายจุลินทรีย์นี้ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคนั้นมีความไวต่ออุณหภูมิได้มากกว่าสารอาหารต่างๆ เช่น วิตามินหรือโปรตีน ดังแสดงในตารางที่ 28 ดังนั้นการใช้อุณหภูมิที่สูงในช่วงเวลาที่สั้นนั้น จะทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์ที่ถูกทำลายได้ในปริมาณที่มากกว่า

การทำลายสารอาหาร ทำให้กระบวนการดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำลายสปอร์ของ *B. stearothermophilus* ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยไม่ทำให้สูญเสียวิตามินที่มีอยู่ในสารอาหาร ดังแสดงได้ในรูปที่ 47

ตารางที่ 28 แสดงพลังงานกระตุ้นของสปอร์แบคทีเรียกับวิตามิน

	พลังงานกระตุ้น (ΔE) (cal/mole)
Folic acid	16,800
d-Panthothenyl alcohol	21,000
Cyanocobalamin	23,100
Thiamine HCl	22,000
Bacillus stearothermophilus	67,700
Bacillus subtilis	76,000
Clostridium botulinum	82,000



รูปที่ 47 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการทำลายเชื้อ *B. stearothermophilau* และไทอามีน

ตารางที่ 29 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์

<u>ความร้อนแบบชื้น</u>

อุณหภูมิไอน้ำ 134 องศาเซลเซียส (207 กิโลพาสคัล, 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เวลา 3 นาที

อุณหภูมิไอน้ำ 126 องศาเซลเซียส (138 กิโลพาสคัล, 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เวลา 10 นาที

อุณหภูมิไอน้ำ 121 องศาเซลเซียส (103 กิโลพาสคัล, 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เวลา 15 นาที

อุณหภูมิไอน้ำ 115 องศาเซลเซียส (69 กิโลพาสคัล, 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เวลา 20 นาที

<u>ความร้อนแบบแห้ง</u>

อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 160 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 170 องศาเซลเซียส เวลา 18 นาที

อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 180 องศาเซลเซียส เวลา $7\frac{1}{2}$ นาที

ตัวอย่างที่ 40 ถ้าต้องการทำลายสปอร์ของ *B. substilis* ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส จงคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการลดสัดส่วนของสปอร์ที่เหลือให้เท่ากับ 10^6 (เมื่อกำหนดคุณสมบัติของสปอร์ของ *B. substilis* มีค่าคงที่ของอาร์เรเนียสเป็น 9.5×10^{37} ต่อนาที และพลังงานกระตุ้นเป็น 68.7 กิโลคาลอรีต่อโมล

<u>วิธีทำ</u> ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส

$$k_d = A \times \exp(-E/RT)$$

$$= 9.5 \times 10^{37} \exp(-68{,}700/(1.9872 \times 388))$$

$$k_d = 0.1922$$

$$\ln(N_o/N_t) = k_d t$$

$$\ln(10^6) = 0.1922\ t$$

$$t = \frac{13.83}{0.1922}$$

$$= 71.9 \text{ min}$$

ตัวอย่างที่ 41 ถ้า F ของการทำลายเชื้อให้ได้ *C. botulinum* 99.999% ต้องใช้เวลานาน 1.2 นาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาฟาเรนไฮต์ จงคำนวณ D ของเชื้อนี้ที่อุณหภูมิเดียวกัน

<u>วิธีทำ</u> การทำลายเชื้อ 99.999% แสดงว่าจะมีเชื้อรอดได้เพียง 1 ใน 100,000 หรือเทียบเท่ากับการลดลงของเชื้อ 5 วงจรลอกาลิทึม

จาก

$$D_T = \frac{F_T}{(SV)}$$

$$= \frac{1.2}{5}$$

$$= 0.24 \text{ นาที}$$

การทำลายจุลินทรีย์ด้วยวิธีทางกายภาพ (Sterilization by Physical Method)

<u>การทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน (Sterilization by heat)</u>

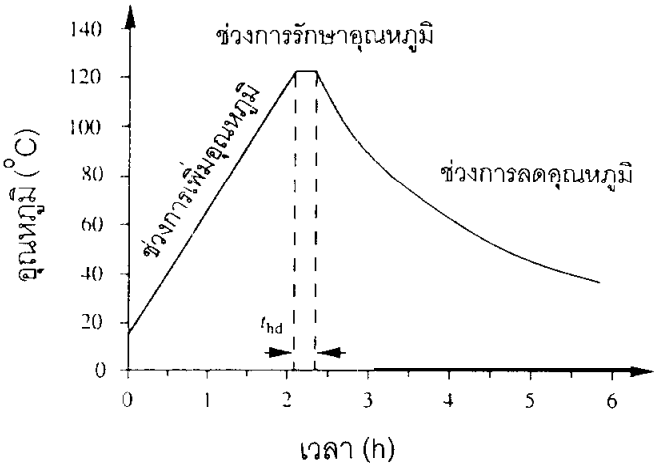
โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ มักมีการทำลายเชื้อที่ปนเปื้อนในอาหารเลี้ยงเชื้อ หรือสารอาหารอื่นๆโดยการให้ความร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ประหยัดและมีประสิทธิภาพ วิธีการให้ความร้อนดังกล่าวโดยปกติ มีอยู่ 3 วิธี คือ

1. การให้ความร้อนโดยการพ่นไอน้ำโดยตรง (stream sparging)
2. การให้ความร้อนโดยการใช้ขดลวดไฟฟ้า (electical heating)
3. การให้ความร้อนผ่านผนังถังหมัก (indirect stream heat exchange)

<u>การทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อนแบบเบชท์ (Batch sterilization)</u>

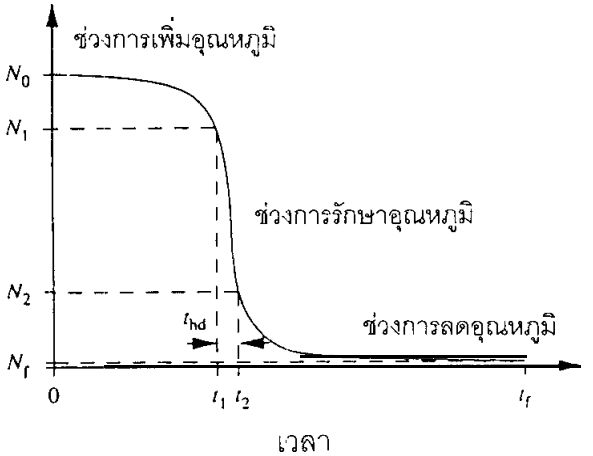
วิธีการทำลายเชื้อปนเปื้อนด้วยความร้อนแบบเบชท์ จะมีขั้นตอนที่สำคัญที่ต้องพิจารณา 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 48 คือ

1. ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายเชื้อ (Heating)
2. ช่วงการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ (Holding)
3. ช่วงการลดอุณหภูมิ (Cooling)



รูปที่ 48 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาของการทำลายเชื้อด้วยความร้อนแบบเบชท์

ในแต่ละช่วงของการทำลายเชื้อด้วยความร้อนนี้ ต่างมีผลต่อการลดปริมาณเชื้อหรือปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 49



รูปที่ 49 แสดงปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือในการทำลายเชื้อด้วยความร้อนแบบเบชท์

จากสมการ $\frac{dN}{dt} = -k_d t$

ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ

$$\nabla_{heating} = \ln \frac{N_o}{N_{heating}}$$

$$= A \exp(-E/RT)\, dt$$

โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมินั้น จะเป็นฟังกชันกับเวลา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 30 ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการทำลายเชื้อด้วย ดังแสดงในรูปที่ 50

ตารางที่ 30 แสดงสมการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาในกระบวนการทำลายจุลินทรีย์แบบเบชท์ชนิดต่างๆ

ระบบที่ใช้	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
การให้ความร้อนโดยการพ่นไอน้ำโดยตรง	$T = T_o \left(1 + \frac{(h M_s t / M_m C_p T_o)}{1 + (M_s t / M_m)}\right)$
การให้ความร้อนโดยผ่านขดลวดไฟฟ้า	$T = T_o \quad 1 + \frac{Q_t}{M_m C_p T_o}$
การให้ความร้อนผ่านผนังถังหมัก	$T = T_s \left(1 + \frac{T_o - T_s}{T_s} - \exp(-UA/M_m C_p)\right)$
การหล่อด้วยน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ	$T = T_{ci} (1 + t_o - T_{ci} \exp((-M_w C_{pw} t / M_m C_p)(1 - \exp(-UA / M_w C_{pw})))$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน

C_p เป็นความจุความร้อนจำเพาะของอาหารเลี้ยงเชื้อ

C_{pw} เป็นความจุความร้อนของน้ำหล่อเย็น

h เป็นเอนทัลปีจำเพาะระหว่างไอน้ำที่ใช้กับอาหารเลี้ยงเชื้อ

M_m เป็นมวลเริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ

M_s เป็นอัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำ

M_w เป็นอัตราการไหลโดยมวลของน้ำหล่อเย็น

Q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน

T เป็นอุณหภูมิ

T_o เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ

T_{ci} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำหล่อเย็น

T_s เป็นอุณหภูมิของไอน้ำ

t เป็นเวลา

U เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ช่วงที่มีอุณหภูมิคงที่

$$V_{hold} = \ln \frac{N_{heating}}{N_{hold}}$$

$$= k_T \, dt$$

$$= \mathbf{A} \ \mathbf{exp} \ (-E/RT) \, dt$$

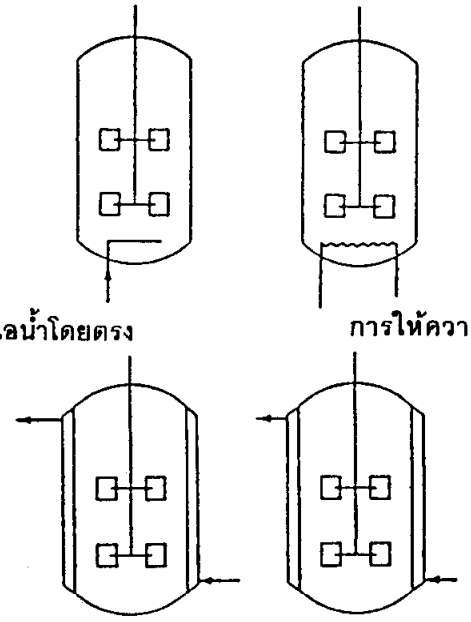
$$= k_T (t_2 - t_1)$$ เมื่ออุณหภูมิคงที่

ช่วงที่มีการลดลงของอุณหภูมิ

$$\nabla_{cooling} = \ln \frac{N_{hold}}{N_{cooling}}$$

$$= A \exp(-E/RT)\, dt$$

ดังนั้น $\nabla_{total} = \nabla_{heating} + \nabla_{hold} + \nabla_{cooling}$



รูปที่ 50 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการทำลายเชื้อด้วยความร้อนแบบเบชท์