Teoretické základy pasterace piva

663.461.1

Ing. JAN ŠAVEL, Jihočeské pivovary, n. p., České Budějovice

Do redakce došlo 5. 11. 1970

I. část. Zákony tepelné destrukce mikroorganismů. Definice pasterační jednotky

Pivo, podobně jako mnoho potravinářských výrobků, podléhá po určité době zkáze. Mechanismus kažení piva je v zásadě dvojího druhu: buď se pomnoží v pivě přítomné mikroorganismy, nebo se tvoří zákal rozmanitými chemickými pochody. Obecně platí, že doba, za kterou se kazí pivo z biologických příčin, je kratší než doba, která odpovídá kažení piva chemickými změnami. Prvotním úkolem k dosažení delší trvanlivosti piva je zamezení vlivu mikroorganismů. To se provádí výrazným snížením množství mikroorganismů v pivě, popř. jejich úplným usmrcením. *Brumstead* [1] ukázal, že k zamezení zkázy piva mikroorganismy stačí omezit jejich počet pod určitou mez. To bude mít i význam teoretický, jak uvidíme v následujících úvahách. Proto považujeme za stabilizační metodu i filtraci piva na konci technologického procesu, i když zároveň splňuje jiné důležité úkoly, např. získání čirého, jiskrného nápoje.

Portno [2] uvádí v přehledu dosud používané metody odstraňování živých mikroorganismů z piva. Rozlišuje tyto druhy zásahů, které výrazně omezují vliv mikroorganismů:

1. klasická pasterace — mikroorganismy jsou usmrcovány působením vyšší teploty po určitou dobu na pivo uzavřené v dopravních obalech;

2. mžiková pasterace — pivo se vystavuje účinkům tepla v průtokových tepelných výměnících, čímž odpadá jinak nezbytné prohřívání a chlazení dopravního obalu. Nevýhodou je komplikované zařízení k aseptickému plnění a sterilace obalů, výhodou menší poškození organoleptických vlastností piva a výhodnější ekonomická kalkulace;

3. sterilační filtrace — provádí se přes speciální membránové filtry, jejichž póry jsou menší než mikroorganismy v pivě. Membránová filtrace požaduje dobrou předfiltraci a rovněž zařízení k aseptickému plnění a sterilaci obalů. Kromě toho bývají filtrační výkony nízké a cena filtračních desek dosti vysoká. Do této skupiny stabilizace lze zařadit i filtraci přes celulózové desky s přísadou azbestu;

4. filtrace přes Ag desky — *Jordan* a *Greenspan* [cit. 2] zjistili, že porézní stříbrná membrána se může použít k filtraci piva. Takové membrány mají póry asi 0,2 až 5 μm a vykazují delší životnost proti membránovým filtrům;

5. chemické prostředky — v poslední době se objevily zprávy o snižování počtu mikroorganismů v pivě, působením různých chemických látek. V ČSSR prováděl rozsáhlé pokusy *Cuřín a kol.* [3].

Často se v praxi používá alespoň kombinace zmíněných metod. Nejčastěji přichází v úvahu dokonalá filtrace, popřípadě s pasterací. Protože se v zásadě musí volit k úplnému usmrcení mikroorganismů určitý přebytek tepla (k dosažení bezpečného účinku), je velmi prospěšné znát dynamiku tepelného účinku na mikroorganismy, aby tento přebytek mohl být minimalizován. Je zřejmé, že pivo, v němž byl počet mikroorganismů snížen některou z filtračních metod, vyžaduje menší množství tepelné energie k usmrcení mikroorganismů. Probereme proto nyní podrobně zákony úhynu mikroorganismů působením tepla.

První práce o dynamice usmrcování mikroorganismů teplem uveřejnili *Ball* a *Olson* (1957) [4], *Cheftel* a *Thomas* (1963) [5, 6] a *Loncin* (1961) [7]. Podrobný výklad poskytl v r. 1966 *Claveau* [8]. Aplikace pro pivovarství vypracoval v letech 1960 [9] a 1968 [10] *Claveau* a *Scriban*. Následující výklad má za úkol seznámit českého čtenáře se zmíněnou problematikou.

Základem teorie jsou dva tepelné zákony, popisující kinetiku úhynu mikroorganismů působením tepla. Platnost zákonů je závislá na těchto předpokladech:

1. teplo působí na dokonale homogenní suspenzi jediného druhu mikroorganismů nebo jeho spor v definovaném prostředí;

2. všechny mikroorganismy v suspenzi mají stejné vlastnosti co do tepelné odolnosti.

Potom lze první zákon vyslovit takto:

Počet mikroorganismů, které přežívají působení tepla, klesá při stálé teplotě exponenciálně s dobou působení. Matematické vyjádření prvního zákona se uvádí nejčastěji v diferenciálním tvaru:

$$[1] \quad \frac{dN}{dt} = -\alpha N \qquad [T = \text{konst.}] \qquad \alpha > 0$$

kde N = počet živých mikroorganismů v čase t. Konstanta α je závislá na teplotě a druhu uvažovaného mikroorganismu.

Integrací rovnice [1] s použitím okrajové podmínky $N = N_0$ v čase $t = 0$ dostáváme analytickou závislost počtu přežívajících mikroorganismů v čase t.

$$[2] \quad N = N_0 \,.\, e^{-\alpha t} \qquad [T = \text{konst.}]$$

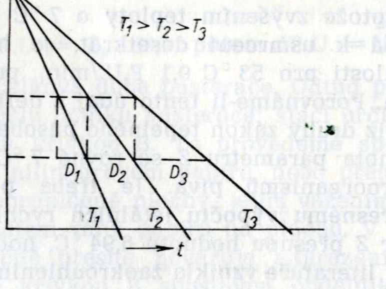
nebo v logaritmickém tvaru:

$$[3] \quad \ln N = -\alpha t + \ln N_0 \qquad [T = \text{konst.}]$$

Podle odvozených vztahů nastane úplné zničení mikroorganismů teprve v nekonečně dlouhém čase

$$(\lim_{t \to \infty} N_0 \,.\, e^{-\alpha t} = 0 \text{ pro } \alpha > 0).$$

V praxi se spokojíme s poklesem počtu mikroorganismů pod určitou mez, kdy je praktické sterility dosaženo. To je ve shodě se zjištěním *Brumsteada* (viz výše), podle něhož k zajištění biologické stability nemusí být usmrceny všechny mikroorganismy.



Obr. 1

Grafickým znázorněním prvního zákona tepelné destrukce v semilogaritmických souřadnicích získáme svazek přímek (viz *obr. 1*). Směrnice přímek mají hodnotu $-\alpha$ a jsou různé pro různé teploty. Jindy se k charakterizaci sklonu přímek používá parametru D, který udává čas potřebný k redukci mikrobiální populace na $^1/_{10}$ původního množství. Zvolme tedy $N = 0{,}1\ N_0$. Potom platí:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\alpha D \qquad D = \frac{-1}{\alpha} \,.\, \ln 0{,}1$$

$$[4] \quad D = \frac{2{,}303}{\alpha}$$ (hodnota ln 0,1 je uvedena se zaokrouhlením na tři desetinná místa)

Z rovnice [4] vyplývá, že D podobně jako α je konstantou závislou na druhu mikroorganismu a teplotě. *Claveau* [7] uvádí tyto hodnoty parametru D pro kvasinky, plísně a vegetativní formy baktérií.

$$D_{65\,°C} = 3{,}5 \text{ s}, \quad D_{70\,°C} = 3{,}5 \text{ s}, \quad D_{75\,°C} = 0{,}35 \text{ s}.$$

Je zřejmé, že při praktickém provádění pasterace není obecně teplota konstantní. Proto k úplnému popisu kinetiky úhynu mikroorganismů je zapotřebí ještě jednoho tepelného zákona. Dříve, než uvedeme jeho formulaci, bude důležité se seznámit s pojmem decimální redukce.

Říkáme, že mikrobiální populace je redukována na *n*tou decimální redukci, jestliže počet žijících zárodků přejde účinkem tepla z počtu N_0 na N_1 podle vztahu:

$$[5] \quad N_1 = N_0\ 10^{-n} \qquad n > 0$$

vztah [5] upravíme logaritmováním:

$$[6] \quad n = \log \frac{N_0}{N_1}$$

Původně byla decimální redukce uvažována pouze pro celá čísla a později se ukázalo, že je účelné uvažovat za n libovolné kladné racionální číslo. V dalších úvahách budeme často používat analogicky zavedené redukce se základem e. Takovou redukci budeme nazývat *n*tou přirozenou redukcí a definovat vztahy:

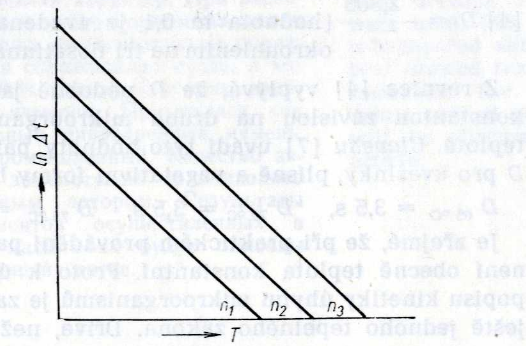
$$[7] \quad N_1 = N_0\, e^{-n}$$

$$[8] \quad n = \ln \frac{N_0}{N_1}$$

Po zavedení pojmu tepelné redukce můžeme vyslovit druhý zákon, popisující destrukci mikroorganismů teplem: Pro stejnou redukci dané mikrobiální populace klesá doba potřebná k redukci exponenciálně, s funkcí zvyšování teploty.

Grafickým znázorněním druhého zákona v semilogaritmických souřadnicích je soustava přímek (*obr. 2*). Pro stejný druh mikroorganismu jsou všechny přímky rovnoběžné a jejich poloha závisí pouze na hodnotě redukce. Někdy se zavádí parametr Z, který je definován jako takové stoupnutí teploty, jímž se redukuje doba k redukci potřebná na $^1/_{10}$ její původní hodnoty. Hodnota parametru Z pro určité prostředí závisí pouze na druhu mikroorganismu, a je proto velmi důležitou konstantou. Pro kvasinky, plísně a vegetativní formy baktérií, je Z = 5 až 7 °C. Podrobněji ukážeme význam parametru Z v dalším výkladu.

Z předchozího vyplývá, že smrticí účinek tepla je závislý na dvou proměnných — na teplotě, při které teplo působí a na době působení. Tak můžeme teoreticky stejný smrticí účinek realizovat pomocí nekonečně mnoha dvojic — teplota — doba působení (Δt). Protože se v praxi působí na mikroorganismy teplem po nějaké teplotní křivce $T = T(t)$ (T = teplota), bylo v pivovarství zavedeno vyjadřování tepelného účinku v termínech pasterační jednotky.



Obr. 2

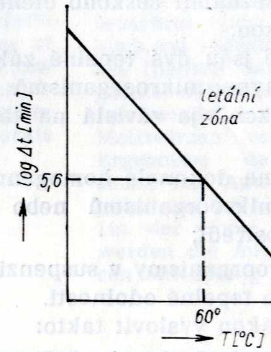
Pasterační jednotka (pasteurisation unit, l'unité de pasteurisation P. U.) je (biologický) letální účinek tepla na mikroorganismy v pivě, získaný udržováním piva při teplotě 140 °F (60 °C) po jednu minutu.

Podkladem pro stanovení pasterační jednotky byla *Del Vecchiem* [11] sestavená křivka závislosti doby nutné k usmrcení populace infekčních mikroorganismů piva na teplotě. Vynesením závislosti v semilogaritmických souřadnicích získal Del Vecchio přímku.

Ve své práci Del Vecchio neposkytl přesné podmínky pokusu; neudal počáteční počet živých mikroorganismů, ale jen % inokula vzatého ze zásobního roztoku infekčních mikroorganismů. V pivovarské praxi je obvykle nutné pasterovat pivo obsahující nejen kulturní kvasinky, ale i jiné druhy infekčních mikroorganismů (divoké kvasinky. baktérie). Takové mikroorganismy mohou vykazovat rozdílnou odolnost vůči působení tepla. *Epstein* a *Snell* [12], udávají dobu potřebnou k zničení laktobacilů 10 min/58 °C, sarcin 10 min/56 °C. *Claveau* [10] sestavoval závislosti čas destrukce — teplota pro 3 druhy kulturních kvasinek, 5 druhů infekčních kvasinek a pro Saccharomyces diastaticus při redukci z 10^5 10^0 kvasinek. Získal (v semilogaritmických souřadnicích) přímky, jejichž směrnice byly téměř shodné se směrnicí Del Vecchiovy přímky. Nejméně odolné byly kulturní kmeny, nejvíce odolné Saccharomyces diastaticus. Přímka Del Vecchiova ležela mezi přímkami kulturních a infekčních kvasinek a mezi přímkou Saccharomyces diastaticus. Závislost Del Vecchiova tedy představuje dobrý odhad pro určení doby nezbytné k usmrcení mikroorganismů piva.

Povšimněme si nyní podrobněji *Del Vecchiovy* závislosti (*obr. 3*).

Přímka rozděluje plochu grafu na dvě části. V levé části grafu zvolme nějaký bod pro určitou (pevnou) teplotu T. Bod je obrazem doby, po kterou působila teplota T na suspenzi mikroorganismů. Posunujeme-li bod po svislé čáře (izotermně), potom v okamžiku, kdy dosáhne Del Vecchiovy přímky, budou všechny mikroorganismy usmrceny. Další udržování suspenze při zvolené teplotě T posunuje bod do smrticí zóny, přičemž všechny mikroorganismy jsou již mrtvé.



Obr. 3

Význam pasterační jednotky nám vyplyne z následující úvahy. Stejného letálního účinku dosáhneme při nějaké teplotě T volbou doby Δt podle Del Vecchiovy přímky. Zaveďme proto novou veličinu— „rychlost biologického umrtvení" (letální rychlost, lethal rate, vitesse de destruction biologique) následujících vlastností:

1. pro každou teplotu má letální rychlost jedinou hodnotu,

2. pro stálou teplotu je celkový letální účinek (vyjádřen v P. U.) dán vztahem:

[9] celkový letální účinek (P. U.) = letální rychlost (P.U./min) × čas (min)

Z toho vyplývá i předpis pro stanovení letální rychlosti. Protože hodnotě 60 °C odpovídá 5,6' min na Del Vecchiově přímce, je zřejmé, že k zmíněné redukci je zapotřebí 5,6 P.U. Potom za 1 minutu byl

$$\text{letální účinek } \frac{5{,}6 \text{ P.U.}}{5{,}6 \text{ min}} = 1 \text{ P.U./min}$$

při teplotě 60 °C. Podobným způsobem můžeme stanovit hodnoty letální rychlosti podle vztahu:

$$\text{letální rychlost } (L_R) \text{ při teplotě } T = \frac{5{,}6}{\Delta t}$$

kde Δt je doba odečtená z Del Vecchiovy přímky při teplotě T.

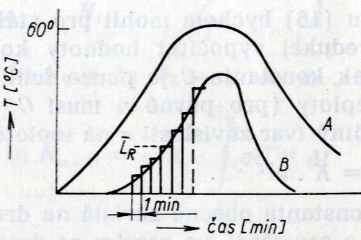
Protože zvýšením teploty o 7 °C se zkrátí doba nutná k usmrcení desetkrát, je hodnota letální rychlosti pro 53 °C 0,1 P.U./min., pro 67° 10 P.U./ /min. Porovnáme-li tento údaj s definicí parametru Z (viz druhý zákon tepelného působení) zjistíme, že hodnota parametru Z se rovná 7 °C pro destrukci mikroorganismů piva. Je třeba poznamenat, že k přesnému výpočtu letálních rychlostí, má parametr Z přesnou hodnotu 6,94 °C, hodnota 7° uváděná v literatuře vznikla zaokrouhlením převodu stupňů Fahrenheitových na Celsiovy.

V literatuře existují tabulky letálních rychlostí pro různé teploty. *Baselt* [13] sestavil tabulky letálních rychlostí pro teploty od 115° do 160° Fahrenheita, *Wedding* [14] pro teploty od 110° do 147° Fahrenheita, dělené po ¼ stupně. *Echevarri* v r. 1966 [15] sestavil řadu letálních rychlostí pro stupně Réaumurovy, Celsiovy a Fahrenheitovy, v rozmezí 130—165° F. Nomografickou formu pro určení L_R a jejich násobků, použil *Blaschke*, *Pospíšil* a *Beyer* [16]. Také v práci *Scribana* [9] nalezneme graficky vyjádřenou závislost letální rychlosti na °Celsia. Pro výpočet můžeme použít i analytických vztahů, jak jsou uvedeny v publikaci *Blaschkea* [16].

[10] $$L_R \text{ (P.U./min)} = 1{,}2023^{\circ F-140} = 1{,}3932^{\circ C-60} = 1{,}5136^{\circ R-48}$$

Protože práce Echevarriho není pro nás dostupná, sestavili jsme tabulku L_R podle vztahu $L_R = 1{,}3932^{\circ C-60}$ dělenou po 0,1 °C (viz příloha).

Ukážeme nyní, jak se získaných vztahů používá v pivovarské kontrole. Abychom mohli číselně vyjádřit účinek pasterace, musíme měřit teplotu v láhvi piva při pasteraci. To se provádí nejlépe registračním teploměrem, který prochází spolu s lahví pastérem a pořizuje grafický záznam průběhu teploty v láhvi. Teploměr musí být přesně seřízen. Čidlo má být umístěno při okraji dna láhve, kde je prohřívání piva nejpomalejší. Firma Gasquet sestrojila pro tento účel dostatečně přesný teploměr s kruhovým záznamem, s dobou otočení 2 hodiny [17].



Obr. 4

Z grafického záznamu teplot lze přesně určit počet pasteračních jednotek. Překreslíme záznam z registračního teploměru do pravoúhlého diagramu (*obr. 4* — křivka A). Potom pomocí tabulky letálních rychlostí přiřadíme každé teplotě hodnotu L_R (volíme obvykle intervaly po 1 minutě), čímž získáme průběh letálních rychlostí v čase (křivka B). Použijeme-li vztahu [9] v diferenciálním tvaru:

[11] $$\mathrm{d\,P.U.} = L_R \,.\, \mathrm{d}t; \quad \text{potom } \Delta \mathrm{P.U.} = \int_0^{\Delta t} L_R \,.\, \mathrm{d}t$$

kde Δt je celková doba pasterace. Odtud plyne návod k výpočtu účinku pasterace; stačí určit plochu ohraničenou křivkou B. To provedeme spočítáním plochy na milimetrovém papíře, nebo přesným vystřižením ohraničené plochy, jejím vážením a zpětným přepočtem váhy papíru na plochu. V praxi se za dostatečně přesné považuje nahrazení plochy ohraničené křivkou B soustavou obdélníků o základě 1 minuta a výšce, kterou určíme jako aritmetický střed dvou krajních hodnot letálních rychlostí (*obr. 4*). Sečtením plochy obdélníků získáme celkový pasterační účinek.

K výpočtu lze použít numerické integrace [19]. Zvláště za použití moderních kancelářských strojů, které dnes najdeme v každém větším pivovaře, je výpočet zcela snadný. Pro ilustraci ukážeme výpočet oběma zmíněnými metodami (*tab. 1*). Jako údajů použijeme tabulky sestavené z grafického záznamu teploty v láhvi při pasteraci. V tabulce jsou uvažovány teploty nad 40 °C. Protože hodnota L_R pro 40 °C je 0,001, je chyba, které se dopustíme menší než 40 . 0,001 = 0,04 P.U. Čas se počítá od okamžiku překročení teploty 40 °C.

Tabulka 1. Příklad výpočtu účinku pasterace

čas [min]	°C	L_R	$\bar{L}_R$	čas [min]	°C	L_R	$\bar{L}_R$
1	40,0	0,001		36	64,8	4,912	5,081
2	41,5	0,002	0,002	37	64,6	4,597	4,754
3	45,4	0,008	0,005	38	64,4	4,302	4,449
4	50,2	0,039	0,024	39	64,2	4,026	4,164
5	53,8	0,128	0,083	40	64,0	3,767	3,896
6	56,0	0,265	0,197	41	63,5	3,192	3,479
7	56,5	0,314	0,290	42	63,4	3,088	3,140
8	59,2	0,767	0,541	43	63,0	2,704	2,896
9	61,0	1,393	1,080	44	62,8	2,531	2,612
10	63,5	3,192	2,293	45	62,5	2,291	2,411
11	63,5	3,192	3,192	46	59,5	0,847	1,569
12	63,5	3,192	3,192	47	58,0	0,515	0,681
13	63,5	3,192	3,192	48	57,5	0,437	0,476
14	63,5	3,299	3,245	49	55,4	0,218	0,327
15	64,0	3,767	3,533	50	50,2	0,039	0,129
16	64,2	4,026	3,897	51	47,8	0,018	0,029
17	64,4	4,302	4,164	52	47,0	0,013	0,016
18	64,6	4,597	4,449	53	46,4	0,011	0,012
19	64,6	4,597	4,597	54	46,0	0,010	0,010
20	65,0	5,249	4,923	55	45,4	0,008	0,009
20				56	43,2	0,004	0,006
—35	65,0	155,249	78,735	57	04,0	0,001	0,002

L_R = letální rychlost, $\bar{L}_R$ = střední letální rychlost

Sečtením hodnot $\bar{L}_R$ získáme celkový pasterační účinek 161,78 P.U. Numerickou integrací podle Simpsonova vzorce [19] přesnější výsledek 162,10 P.U. Pro praktické účely stačí vyhledávat hodnoty L_R na setiny P.U., čímž se výpočet usnadní.

Kromě zmíněných metod existují ještě rychlé, přibližné metody, které jsou založeny na nahrazení plochy ohraničené křivkou letálních rychlostí jednoduchými plošnými obrazci (trojúhelník, obdélník), jejichž plochu dovedeme snadno stanovit [17].

Popsaná metoda umožňuje pivovarníkovi provádět kontrolu pasterace. Je samozřejmé, že zbytečný přebytek tepla zhoršuje organoleptické vlastnosti piva i jeho koloidní stabilitu. Významná je ekonomická stránka problému, neboť náklady na pasteraci představují značnou část nákladů na stáčení piva. Pro zajímavost uvádíme hodnoty, které *Scriban* [9] udává jako průměrnou hodnotu v r. 1955 pro USA: 13,7 P.U. se škodlivými extrémy 0,5 a 80 P.U. Tato hodnota představující v USA velkou praktickou jistotu, je více než dvakrát tak velká než hodnota nahrazená v laboratoři. Ve Francii jsou hodnoty v průměru vyšší a dosahují špičkové hodnoty 180 P.U. Podle firemního listu fy Gasquet, je hodnota 25—30 P.U. dostačující pro většinu evropských pivovarů.

Moderní laboratorní praxe sestavila metody, kterými lze rozborem pasterovaného piva přibližně odhadnout množství pasteračních jednotek dodaných při pasteraci [18]. Tak je možno i zpětně určit poruchy při pasteraci.

II. část. Souvislost mezi zákony tepelné destrukce a pasterační jednotkou

V druhé části rozšíříme platnost uvedených zákonů, vyšetříme jejich vztah k údajům tepelné destrukce, vyjadřovaných pomocí P.U. a odvodíme důležitou souvislost mezi snížením obsahu mikroorganismů v pivě a nezbytným počtem pasteračních jednotek nutných k jejich usmrcení. Všechny vztahy budou předpokládat působení tepla na suspenzi jediného mikroorganismu a splnění základních předpokladů 1, 2 ze str. 185.

Nejprve převedeme druhý zákon popisující destrukci mikroorganismů teplem do matematických vztahů. Tím získáme následující rovnici:

[12] $$\Delta t = C \,.\, e^{-\beta T} \qquad [n = \text{konst.}]$$

kde Δt = doba potřebná k určité přirozené redukci mikroorganismů n,
T = teplota,
C = konstanta závislá na n,
β = konstanta závislá pouze na druhu mikroorganismu.

Vztah [12] lze vyjádřit i v logaritmickém tvaru:

[13] $$\ln \Delta t = -\beta T + \ln C$$

Závislost [13] v semilogaritmických souřadnicích poskytuje soustavu přímek vzájemně rovnoběžných. Del Vecchiova přímka je jednou z nich. Podobně jako první zákon můžeme i druhý zákon tepelné destrukce vyjádřit v diferenciálním tvaru:

[14] $$\frac{\mathrm{d}\,\Delta t}{\mathrm{d}T} = -\beta\,\Delta t$$

Ukážeme nyní souvislost mezi parametrem Z a konstantou β. Nechť pro teplotu T_1 je zapotřebí k určité redukci mikroorganismů doba Δt_1, pro teplotu T_2 doba Δt_2. Potom platí

$$\ln \Delta t_1 = -\beta\, T_1 + \ln C$$
$$\ln \Delta t_2 = -\beta\, T_2 + \ln C$$

Odečtením obou rovnic a dosazením podmínky pro Z (viz definice parametru Z) získáme vztah:

$$\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \beta\,(T_2 - T_1)$$

Jestliže např. $T_1 < T_2$, $\Delta t_1 > \Delta t_2$, potom platí

$$2{,}303 \log \frac{\Delta t_1}{0{,}1\,\Delta t_1} = \beta\, Z$$

kde 2,303 je přepočítávací faktor přirozeného logaritmu na dekadický

[15] $$Z = \frac{2{,}303}{\beta}$$

Všimněme si formální analogie mezi parametry D a Z a konstanty α i β v obou zákonech.

Vztah [15] nám umožňuje vypočítat hodnotu konstanty β. Pro $Z = 6{,}94°$ získané z Del Vecchiovy přímky (kvasinkovité mikroorganismy cizí i kulturní mají téměř stejnou hodnotu parametru Z) je

$$\beta = 0{,}3316$$

To umožňuje pomocí vztahu [12] vypočítat změnu doby, nutné k usmrcení mikroorganismů při změně teploty, která na mikroorganismy působí.

Mezi oběma zákony tepelné destrukce existuje úzká souvislost. Uvažujeme suspenzi mikroorganismů, na které provedeme při zvolené teplotě T určitou tepelnou redukci n.

Potom platí

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\alpha_T \,.\, \Delta t \qquad [n = \text{konst.}]$$

kde α_T je hodnota konstanty α pro teplotu T. Dobu Δt můžeme také vyjádřit z druhého zákona tepelné destrukce.

$$\Delta t = C \,.\, e^{-\beta T} \qquad [n = \text{konst.}]$$

kde C je konstanta závislá na hodnotě uvažované redukce. Spojením obou vztahů získáme rovnici:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\alpha_T \,.\, C\, e^{-\beta T}$$

[16] $$C = -\frac{1}{\alpha_T} \,.\, e^{\beta T} \quad \ln \frac{N}{N_0}$$

Ze vztahu [16] bychom mohli pro stálou teplotu a různou redukci vypočítat hodnoty konstanty C. Protože však konstanta C je pouze funkcí redukce a nikoli teploty (pro pevné n musí C = konst.), existuje jediný tvar závislosti α na teplotě:

[17] $$\alpha = K\, e^{\beta T}$$

kde K je konstanta obecně závislá na druhu mikroorganismu a prostředí, ve kterém se destrukce provádí.

Máme-li nyní k dispozici časový průběh teploty, kterou se působí na suspenzi mikroorganismů (tak je tomu při pasteraci), můžeme psát s použitím vztahu [1]

$$\mathrm{d} \ln N = -\alpha\,(T)\, \mathrm{d}t$$

$$\int_{N_0}^{N} \mathrm{d} \ln N = -\int_0^{\Delta t} K \,.\, e^{\beta T(t)}\, \mathrm{d}t$$

kde $T(t)$ je časový průběh teploty. Integrací získáme vztah

[18] $$\ln \frac{N}{N_0} = -K \,.\int_0^{\Delta t} e^{\beta T(t)}\, \mathrm{d}t$$

který umožňuje obecně určit množství živých organismů v čase Δt při počátečním množství N_0 živých mikroorganismů. Konstantu K určíme experimentálně pomocí α, nebo, máme-li k dispozici křivku typu

Del Vecchiovy se zadanou redukcí jednoduše vypočteme pro libovolně zvolenou T = konst.

Zbývá ještě určit souvislost mezi pasterační jednotkou a tepelnou redukcí. Podle definice je pasterační jednotka takový letální účinek, který získáme udržováním piva po 1 min. při 60 °C. Ale mírou letálního účinku je přirozená nebo decimální redukce. Působme tedy po dobu t_1 po nějaké křivce $T(t)$ na suspenzi mikroorganismů. Potom můžeme hodnotu redukce vypočítat podle vztahu

$$\ln \frac{N_1}{N_0} = -K \cdot \int_0^{t_1} e^{\beta T(t)} \, dt$$

N_1 je počet živých mikroorganismů v čase t_1 a obdobně

$$\ln \frac{N_2}{N_1} = -K \int_{t_1}^{t_2} e^{\beta T(t)} \, dt$$

N_2 je počet živých mikroorganismů v čase t_2

$$\ln \frac{N_n}{N_{n-1}} = -K \cdot \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{\beta T(t)} \, dt$$

N_n je počet živých mikroorganismů v čase t_n

Sečtením rovnic získáme důležitý vztah

$$[19] \quad \sum_1^n \ln \frac{N_i}{N_{i-1}} = \sum_1^n -K \int_{t_1}^{t_i} e^{\beta T(t)} \, dt$$

$$\ln N_1 - \ln N_0 + \ln N_2 \ln N_1 + \ldots\ldots\ldots +$$

$$+ \ln N_n - \ln N_{n-1} = -K \cdot \int_0^{t_n} e^{\beta T(t)} \, dt$$

$$[20] \quad \ln \frac{N_n}{N_0} = -K \int_0^{t_n} e^{\beta T(t)} \, dt$$

Ze vztahu [20] vyplývá výhoda volby decimální nebo přirozené redukce jako míry letálního účinku. Jednotlivé příspěvky letálního efektu se dají jednoduše sčítat. Ukážeme nyní odvození vztahu pro výpočet celkového letálního efektu v pasteračních jednotkách přímo pomocí integrálu [18]. Volme dobu působení 1 min, teplota 60 °C. Potom podle definice pasterační jednotky je vypočtená redukce ekvivalentní 1 pasterační jednotce

$$\ln \frac{N}{N_0} = -K \int_0^1 e^{\beta 60} \, dt = -K \cdot e^{60\beta}$$

V obecném případě platí:

$$x \, (-K) \, e^{60\beta} = -K \int_0^{\Delta t} e^{\beta T(t)} \, dt$$

kde x = počet pasteračních jednotek dodaných za dobu Δt

odtud

$$[21] \quad x = e^{-60\beta} \int_0^{\Delta t} e^{\beta T(t)} \, dt$$

Ze vztahu [21] lze jednoduše odvodit závislost letální rychlosti na teplotě. Volme konstantní teplotu T. Potom platí

$$x = e^{-60\beta} \cdot e^{\beta T} \, \Delta t = e^{\beta(T-60)} \cdot \Delta t$$

$$[22] \quad L_R = \frac{x}{\Delta t} = e^{\beta(T-60)}$$

Dosazením hodnoty $\beta = 0{,}3316$ získáme vztah

$$L_R = e^{0{,}3316\,(T-60^\circ)} = 1{,}3932^{(T-60^\circ)}$$

což se shoduje se závislostí udávanou Blaschkem (viz vztah 10). Podobné vztahy získáme volbou jiné teplotní stupnice pro Réaumura i Fahrenheita.

Povšimněme si, že výpočet letálního efektu pasterace pomocí tabulky L_R podle některé z dříve uvedených metod není ničím jiným než grafickým stanovením integrálu [21].

Závěrem ukážeme, jak souvisí počet pasteračních jednotek s počtem mikroorganismů v pivě, nebo-li s kvalitou filtrace. Předpokládejme, že redukujeme suspenzi o množství N_0 mikroorganismů jednoho druhu na požadovanou hodnotu N_1. K tomu je zapotřebí x_1 pasteračních jednotek

$$x_1 = e^{-60\beta} \int_0^{\Delta t} e^{\beta T(t)} \, dt = -\frac{1}{K} \cdot \ln \frac{N_1}{N_0}$$

$$e^{-60\beta}$$

Snížíme-li filtrací počáteční množství mikroorganismů z N_0 na N_0' bude zapotřebí x_2 pasteračních jednotek

$$x_2 = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{N_1}{N_0'} \cdot e^{-60\beta}$$

Porovnáním obou vztahů získáme důležitou závislost

$$[23] \quad \frac{x_1}{x_2} = \frac{\ln \dfrac{N_1}{N_0}}{\ln \dfrac{N_1}{N_0'}} = \frac{\log \dfrac{N_1}{N_0}}{\log \dfrac{N_1}{N_0'}}$$

$$N_0 + N_0' + 1$$

Například při redukci kvasinek v pivě na 1 kvasinku/láhev (což zaručí bezpečnou sterilitu, neboť teplota se určuje v nejstudenějším bodě láhve) získáme závislost:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{\log N_0}{\log N_0'}$$

$$\text{Pro} \quad \frac{N_0}{N_0'} = \frac{100}{10} \quad \text{je} \quad \frac{x_1}{x_2} = \frac{1}{2}$$

neboli, snížíme-li filtrací počet kvasinek 10krát, sníží se potřebný počet P.U. 2krát.

Příloha 1. Tabulka letálních rychlostí

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
40	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
41	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
42	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
43	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005
44	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007
45	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
46	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013
47	0,013	0,014	0,014	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,018	0,018
48	0,019	0,019	0,020	0,021	0,021	0,022	0,023	0,024	0,024	0,025
49	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,034	0,035
50	0,036	0,038	0,039	0,040	0,041	0,043	0,044	0,046	0,047	0,049
51	0,051	0,052	0,054	0,056	0,058	0,060	0,062	0,064	0,066	0,068
52	0,070	0,073	0,075	0,078	0,080	0,083	0,086	0,089	0,092	0,095
53	0,098	0,101	0,105	0,108	0,112	0,116	0,120	0,124	0,128	0,132
54	0,137	0,141	0,146	0,151	0,156	0,161	0,167	0,173	0,178	0,184
55	0,191	0,197	0,204	0,210	0,218	0,225	0,233	0,240	0,248	0,257
56	0,265	0,274	0,284	0,293	0,303	0,314	0,324	0,335	0,346	0,358
57	0,370	0,382	0,395	0,409	0,422	0,437	0,451	0,466	0,482	0,498
58	0,515	0,533	0,551	0,569	0,588	0,608	0,629	0,650	0,672	0,694
59	0,718	0,742	0,767	0,793	0,820	0,847	0,876	0,905	10,936	0,968
60	1,000	1,034	1,069	1,105	1,142	1,181	1,220	1,261	1,304	1,348
61	1,393	1,440	1,489	1,539	1,589	1,645	1,670	1,757	1,817	1,878
62	1,941	2,007	2,074	2,144	2,216	2,291	2,368	2,448	2,531	2,616
63	2,704	2,795	2,890	2,987	3,088	3,192	3,299	3,411	3,526	3,645
64	3,768	3,895	4,026	4,162	4,302	4,447	4,597	4,752	4,912	5,078
65	5,248	5,426	5,609	5,798	5,993	6,196	6,404	6,620	6,844	7,074
66	7,313	7,559	7,814	8,078	8,350	8,632	8,923	9,223	9,534	9,855
67	10,188	10,532	10,889	11,254	11,633	12,026	12,431	12,850	13,284	13,731
68	14,194	14,673	15,168	15,679	16,207	16,754	17,319	17,903	18,506	19,131
69	19,775	20,442	21,131	21,843	22,580	23,342	24,129	24,492	25,783	26,652
70	27,551									

Tabulka je sestavena výpočtem podle formule podle Blaschka [16] $L_R = 1{,}3932^{\,°C-60}$

Souhrn

Článek vysvětluje základy kinetiky úhynu mikroorganismů působením tepla. Po vyložení základních zákonů, jsou probrány aplikace pro pivovarství. Pomocí pasterační jednotky, definované na základě Del Vecchiovy křivky, je objasněna výpočtová metoda sloužící k hodnocení pasteračního účinku.

V druhé části článku jsou vyloženy vztahy mezi vyjadřováním letálního účinku v pasteračních jednotkách a zákony tepelné destrukce. Jako příloha je uvedena tabulka letálních rychlostí pro teploty 40 až 70 °C, s dělením po 0,1 °C.

Lektoroval Ing. M. Rychtera, CSc.

Literatura:

[1] BRUMSTEAD, D. D. — GLENISTER, P. R.: Brewers Digest, **38**, 1963: 49—52.

[2] PORTNO, A. D.: Intern. Botter and Packer 42, No 8, 1968: 53—56

[3] CUŘÍN, J., a kol.: Kvas. průmysl, 7—8, 1970: 145—148.

[4] BALL, C. O. — OLSON F. C. M.: Sterilization in food technology. Mc Graw Hill Book Company Inc, New York, 1957.

[5] CHEFTEL, H.: La valeur alimentaire des Conserves Appertisérs. Bull. N° 11. Ganthier-Villars et Cie édit. Paris 1951.

[6] THOMAS, J. A.: Problémes d'organisation et de fonction chez les Bactéries et les Virus. Masson et Cie édit. Paris 1958.

[7] LONCIN, M.: Les opérations Unitaires du Génie Chimique. Dunod édit. Patis, 1961.

[8] CLAVEAU, J.: Génie Chimique, **96**, 1966: 1359—1370.

[9] SCRIBAN, R.: Brasserie, N° 168, 1960: 246.

[10] CLAVEAU, J. - SCRIBAN, R. - STROBBEL, B. CARPENTIER, J.: International Brewers Journal September 1968.

[11] DEL VECCHIO, H. W. - DAYHARSH, C. A. BASELT, F. C.: A. S. B. C. Proceed. 1951: 45.

[12] EPSTEIN, S. S. SNELL, F. D.: J. Inst. Brew., **46**, 1940: 175.

[13] BASELT, F. C.: Brewers Digest 33, No 5, 1958: 56.

[14] WEDDING, G.: Wall. Lab Comm., XXXI, No **104**, 1968: 53—55.

[15] ECHEVARRI, A.: Anuario Técnico, Asoc. de Maestros Cerveceros de America, Distrito Mexico (cit. 16).

[16] BLASCHKE, E. POSPISIL, V. BYER, A. J.: Wall. Lab. Comm. **29**, No 100, 1966: 127.

[17] EFFICACITÉ de la PASTEURISATION. Firemní listy firmy GASQUET.

[18] SCRIBAN, R. CARUYER, O. NOEL J. P.: Brauwissenschaft **22**, 1969: 398—402.

[19] Numerické metody pro aplikace v chemii, Skripta VŠCHT, 1967, Praha.