

Přímý ohmický ohřev potravin

Ing. Jaromír Štanc

Vedoucí práce: Prof. Ing. Rudolf Žitný, CSc.

Abstrakt

Přímý ohmický ohřev je moderní metoda termického ošetření potravinářských látek. Teplo je v ohřívané potravíně generováno přímo průchodem elektrického proudu v důsledku jejího elektrického odporu. Přednosti přímého ohmického ohřevu jsou jeho vysoká rychlost a snadná možnost řízení a monitorování. Tyto vlastnosti předurčují nasazení této technologie v aplikacích pasterizace a sterilizace potravin. Nasazení však stále komplikují problémy spojené s touto technologií, jako např. doprovodné elektrochemické děje spojené s korozí elektrod, nejasné příčiny tvorby úsad potraviny na elektrodách a nevyjasněné děje na rozhraní potravina- elektroda. Cílem příspěvku je prezentovat výsledky výzkumu v oblasti přímého ohmického ohřevu tuhých a tekutých potravin, jako jsou: vliv materiálu elektrod, vliv operačních parametrů, vliv napájení, přítlačného tlaku, problematika tvorby úsad ad. Cílem je návrh reálného zařízení přímého ohmického ohřevu pro průmyslové nasazení (pasterizace, sterilizace) i v oblasti provozů typu fastfood.

Klíčová slova

Přímý ohmický ohřev; koroze elektrod; pasterizace; sterilizace; ohřev potravin; přítlačný tlak; úsady

1. Úvod

Cílem tepelných procesů v potravinářském průmyslu v oblasti sterilizace či pasterizace potravin, je zajistit jejich mikrobiální bezpečnost a současně co nejvíce zachovat její nutriční hodnoty. K zajištění mikrobiální bezpečnosti ošetřované potraviny je nutné zahřát potravinu na pasterizační teplotu a zajistit požadovanou výdrž na této teplotě. Z hlediska zachování kvality potraviny, která je v důsledku tepelného zpracování degradována (např. termická denaturace vitamínů), je naopak požadována co nejmenší tepelná expozice potraviny. Je tedy výhodnější zahřát potravinu na co nejvyšší teplotu (UHT), kdy lze významně snížit dobu výdrže na teplotě – tím dojde k požadovanému ošetření z hlediska mikrobiální bezpečnosti s minimálním narušením nutričních hodnot. Ovšem technická realizace aparátu, který by tyto požadavky splnil, je užitím standardních metod problematická (používá se např. přímý vstřík sterilní páry do tekuté potraviny atp.).

Přímý ohmický ohřev je technologie, která je díky svým vlastnostem vhodná k zajištění UHT ošetření. Při přímém ohmickém ohřevu je teplo v ohřívané potravíně generováno vlivem průchodu elektrického proudu přímo elektricky vodivou potravinou v důsledku jejího elektrického odporu. Výhodou této metody je velmi rychlý ohřev potraviny na vysokou teplotu a rovněž jednoduchý způsob řízení ohřevu. Nevýhody jsou pak spojeny s doprovodnými elektrochemickými ději, způsobujícími elektrochemickou korozi elektrod, tvorbou úsad potraviny na elektrodách a nejasný vliv elektrického proudu na potravinu.

První patent průtočného pasterizačního zařízení se objevuje v USA již v roce 1897 – Jones (1897). Metoda přímého ohmického ohřevu byla znovu objevena na konci 20. století, kdy se stala předmětem četných studií - Stirling (1987); Skudder a Biss (1987); Zhang a Fryer (1993); Zareifard et al. (2003); Icier a Ilcali (2005) a to v širokém spektru aplikací. Práce Samaranayake a Sastry (2005), Amatore et al. (1998), Samaranayake et al. (2005) se zaměřily na problém elektrochemické koroze během přímého ohmického ohřevu, Ayadi et al. (2004) zase na problém tvorby úsad na elektrodách. V současné době však spousta otázek spojených s přímým ohmickým ohřevem zůstává stále nezodpovězena, jako vliv materiálu a povrchu elektrod, vliv napájecí frekvence a tvaru pulsů, děje na rozhraní potravina-elektroda a příčiny tvorby úsad.

Možné konkrétní aplikace metody přímého ohmického ohřevu se nabízejí spíše v průmyslovém měřítku při realizaci procesu UHT sterilizace. Další využití lze najít v provozech typu fastfood (např. výroba hamburgerů) a díky své jednoduchosti i v oblasti kosmického výzkumu při přípravě pokrmů přímo ve vhodných obalech.

2. Popis experimentů, použité materiály

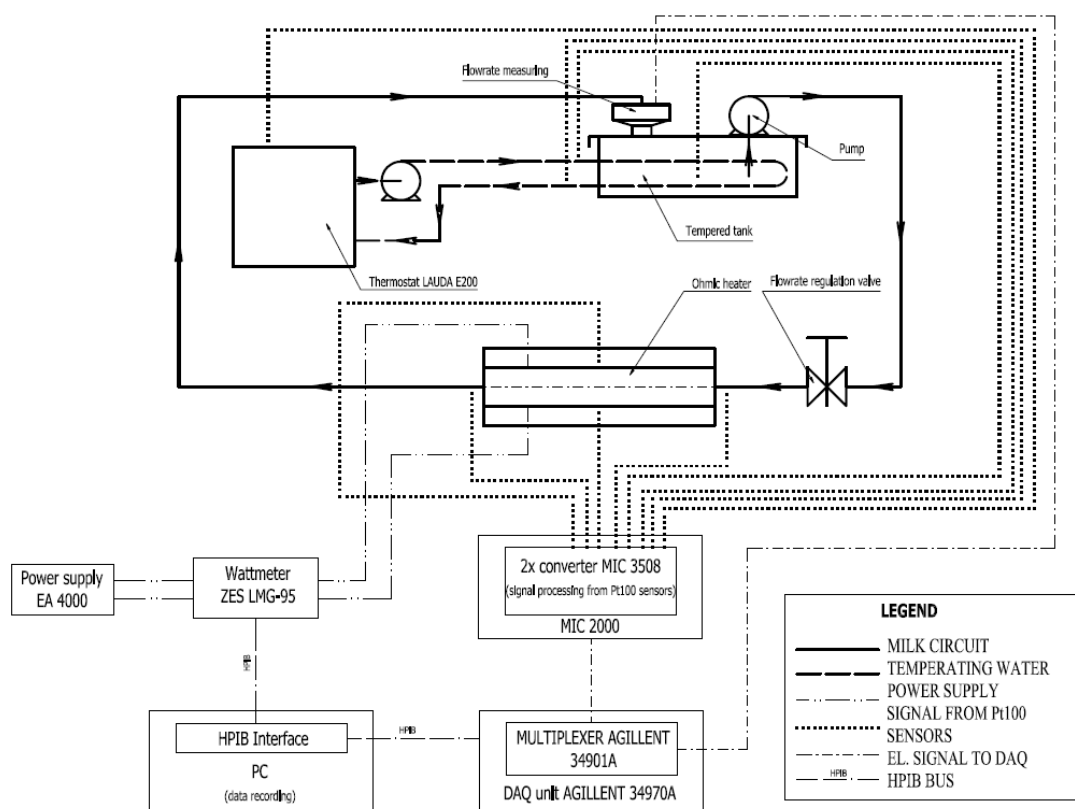
Pro výzkum v oblasti přímého ohmického ohřevu byla sestavena laboratorní aparatura pro přímý ohmický ohřev tuhých potravin a laboratorní aparatura pro přímý ohmický ohřev tekutých potravin průtočně.

V rámci provedených experimentů byl zkoumán vliv materiálu elektrod na tvorbu úsad při přímém ohmickém ohřevu mléka – Štancl a Žitný (2009) a vliv přítlačného tlaku na rychlost ohřevu plátku sekané – Trpišovský (2005).

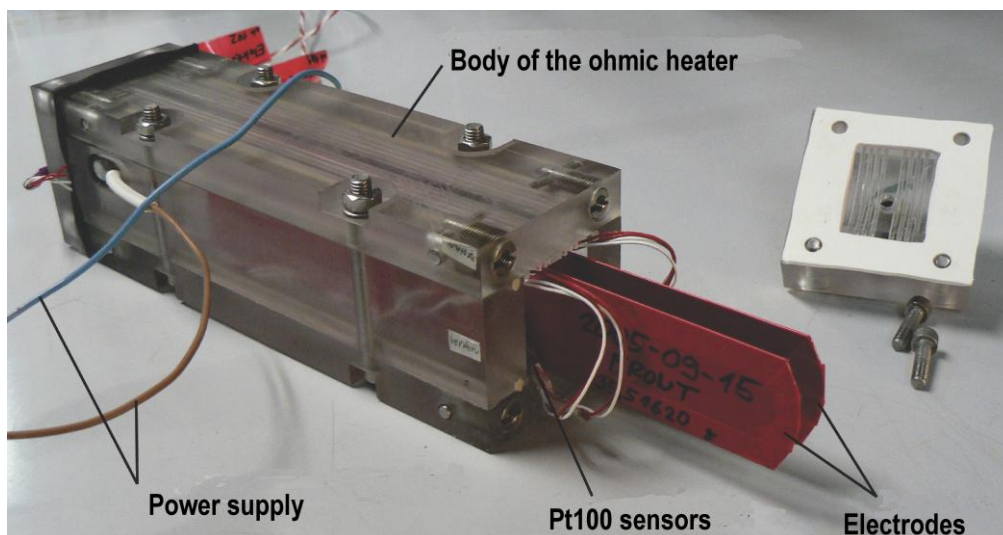
2.1. Sestavení aparatury pro průtočný přímý ohmický ohřev tekutých potravin

Tato aparatura je používána především ke studiu tvorby foulingu během přímého ohmického ohřevu mléka. Aparatura se skládá z vlastního průtočného ohmického ohřivače, který je tvořen tělesem, v němž je umístěna dvojice elektrod. Elektrody o rozměrech 220x30 mm vytvářejí obdélníkový kanál, jímž protéká ohřívaná potravina. Elektrody jsou izolovány mimo malou obdélníkovou část uprostřed ohřivače (aktivní plocha 0,0012 m²) z důvodu stabilizace proudu a dosažení relativně vysokých hodnot hustoty elektrického proudu (okolo 2500 A.m⁻²) i při použití malého laboratorního napájecího zdroje. Vzdálenost elektrod je volena jako fixní

10 mm. Z důvodu relativně malého výkonu ohřívače je systém doplněn temperovanou nádobou pro předeřev mléka na teplotu pasterizace. Měřeny jsou teploty na vstupu a výstupu tekutiny z ohřívače, teploty obou elektrod a teplota v temperační nádrži. Teploty jsou měřeny sondami Pt100, pomocí převodníku snímány měřicí ústřednou Agilent (Agilent inc., USA) do PC. Elektrické veličiny (napětí, proud a příkon) jsou měřeny elektronickým wattmetrem ZES LMG95 (Zes Zimmer GmbH, Německo) a načítány do PC přes rozhraní GPIB. Průtok je měřen indukčním průtokoměrem. Sestavení aparatury je patrné z obrázku 1, na obrázku 2 je fotografie průtočného ohmického ohřívače. K zjištění vlivu materiálu elektrody na rychlost tvorby úsad byly použity elektrody z nerezové oceli, elektrody z nerezové oceli povlakované titan-nitridem a elektrody grafitové. Experimenty byly prováděny pro 3 různé hodnoty průtoku tekutiny (ovládáno pomocí šoupěte), 3 různé počáteční teploty tekutiny (65, 70 a 75 °C) a 3 různé počáteční hodnoty elektrického proudu. Experiment byl ukončen při poklesu elektrického proudu pod 0,8 A, nebo po uplynutí 3h. Ohřivanou látkou bylo konzumní mléko (Olma, ČR) ošetřené šetrnou pasterizací – objem 5 l proudící v uzavřené smyčce. K napájení bylo použito střídavé napětí cca 24 V / 50 Hz.



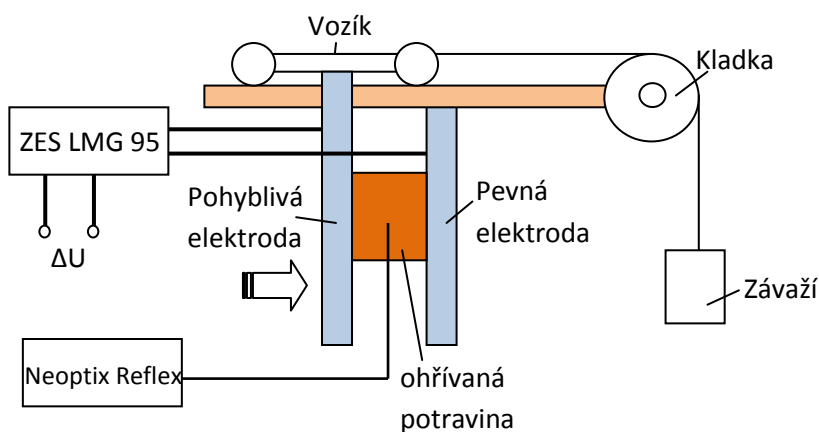
Obr. 1 Sestavení aparatury pro průtočný přímý ohmický ohřev tekutých potravin



Obr. 2 Průtokový ohmický ohřivač pro průtočný přímý ohmický ohřev tekutých potravin

2.2. Sestavení aparatury pro přímý ohmický ohřev pevných potravin – vliv přítlačného tlaku na rychlost ohřevu plátku sekané

Zařízení pro přímý ohmický ohřev se sestává z dvojice deskových elektrod z nerezové oceli. První elektroda je pevně uchycena k přípravku, druhá elektroda je pohyblivá. Posuvný pohyb elektrody je umožněn pohyblivým vozíkem umístěným na přípravku, jehož pohyb je ovládán táhlem vedeným přes kladku. Na táhlo jsou zavěšována závaží, které zajistí požadovaný přítlak elektrod k ohřívané potravíně – viz obr. 3.



Obr. 3 Schéma aparatury pro přímý ohmický ohřev tuhých potravin

Vzorek tuhé potraviny (sekané) o rozměrech 20 x 20 x 20 mm byl vložen mezi elektrody a na táhlo bylo zavěšeno závaží. Teplota uvnitř vzorku potraviny byla měřena optovláknovými snímači Reflex (Neoptix, Kanada) a to v geometrickém středu, u okraje a mezi okrajem a středem vzorku. Elektrody byly napájeny běžným střídavým napětím 20 V z laboratorního zdroje, elektrické veličiny byly měřeny elektronickým wattmetrem ZES LMG 95 (ZES Zimmer GmbH, Německo).

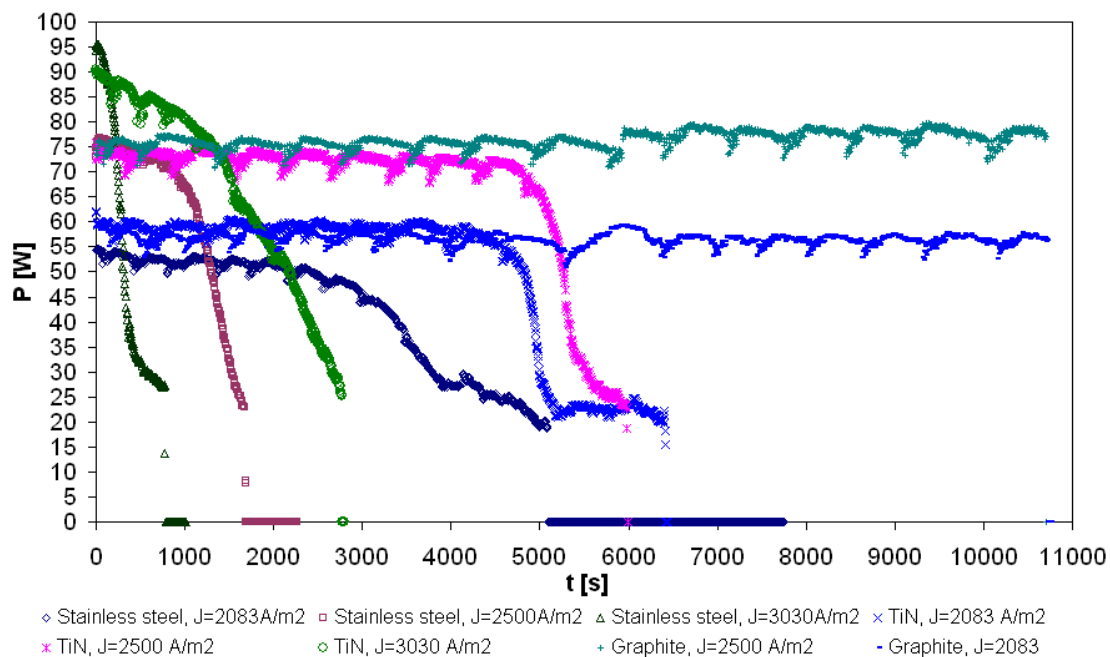


Obr. 4 Přímý ohmický ohřev plátku sekané

3. Shrnutí výsledků experimentů

3.1. vliv materiálu elektrod na tvorbu úsad při přímém ohmickém ohřevu mléka

Na obrázku 5 je vidět typický průběh elektrického příkonu ohřivače na čase a v tabulce 1 jsou uvedeny odpovídající doby s přibližně konstantním elektrickým příkonem (lag-fáze).



Obr. 5 Vliv hustoty elektrického proudu a materiálu elektrod na rychlost tvorby úsad mléka na elektrodách

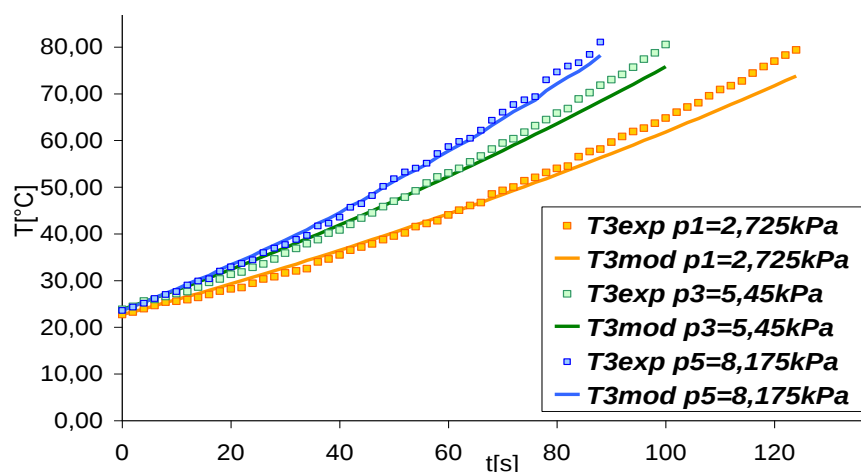
Tab. 1 Doby trvání lag-fáze pro různé materiály elektrod

	t_{lg} [s] nerezová ocel	t_{lg} [s] nerezová ocel s TiN povlakem	t_{lg} [s] grafitová elektroda
$J=2000 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$	2860	4650	10800
$J=2500 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$	1340	4770	10800
$J=3030 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$	165	820	

Časový průběh elektrického příkonu lze rozdělit na 2 úseky – úsek s přibližně konstantním elektrickým příkonem (lag-fáze) a úsek rychlého poklesu příkonu. Doba nástupu fáze rychlého poklesu je ovlivněna operačními parametry (průtokem média, teplotou média a proudovou hustotou). Získané výsledky ukazují silný vliv materiálu elektrod a významný vliv proudové hustoty. Výsledky experimentů ukazují, že probíhající elektrochemická koroze může být stejně důležitá, jako denaturace syrovátkových proteinů.

3.2. vliv přitlačného tlaku na rychlost ohřevu plátku sekané

V grafu na obrázku 6 je vidět časová závislost teploty v geometrickém středu plátku sekané pro různé hodnoty přitlačného tlaku. Z obrázku 6 je vidět, že s rostoucím přitlačným tlakem roste i rychlost ohřevu.



Obr. 6 Vliv přitlačného tlaku na rychlost ohřevu

U obou experimentů se potvrdil významný vliv elektrochemické koroze kovů, která se projevuje silnou závislostí materiálu elektrod a proudové hustoty na tvorbu úsad při přímém ohmickém ohřevu mléka. Při přímém ohmickém ohřevu plátku sekané je patrný kovový zápach ohřáté potraviny.

4. Diskuze, návrh možností aplikace přímého ohmického v průmyslu

4.1 Singularity v elektrickém poli

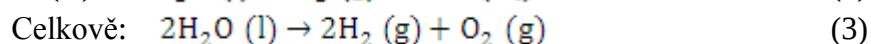
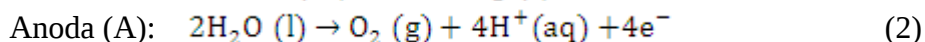
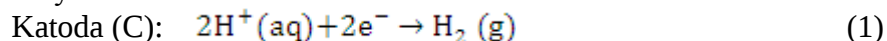
V důsledku drsnosti povrchu elektrody (ostré hrany) mohou vznikat na ostrých hranách a nerovnostech singularity v elektrickém poli, což může vést k lokálnímu přehřátí ohřívané tekutiny a tím i k aktivnější tvorbě úsad. Vliv singularit elektrického pole při ohřevu kapalných potravin je předmětem současného výzkumu. Z modelu, který byl publikován

v časopise Štancl, Nový, Žitný (2008) je vidět, že projev singularit je významný při hrubších rýhách větší hloubky, než v případě úrovně drsnosti povrchu materiálu.

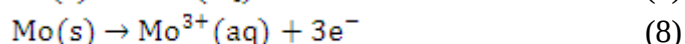
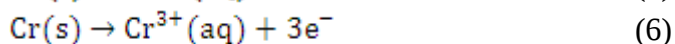
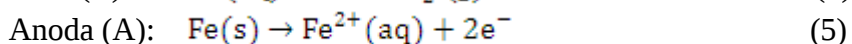
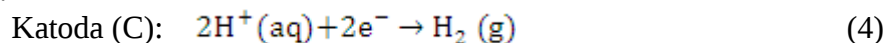
4.2 Elektrochemická koroze elektrod během ohřevu

Elektrochemické reakce v systému elektroda – elektrolyt (redoxní reakce a proces elektrochemické koroze) začnou vznikat po připojení napájecího napětí. Následující rovnice, které sumarizoval Assiry et al. (2006) popisují elektrochemickou korozi nerezové oceli:

1. Elektrolytický rozklad vody:



2. Koroze nerezové oceli:



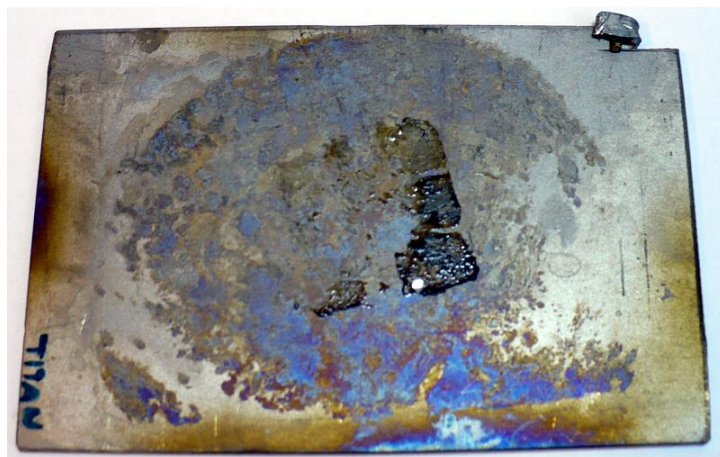
Kov migrující z elektrody do ohříváné potraviny může být oxidován a tím iniciovat další sekundární reakce. Např. Fe^{2+} nebo Fe^{3+} mohou působit jako katalyzátor. Následující obrázek 7 ukazuje fotografii elektrody po skončení fouling-experimentu při přímém ohmickém ohřevu mléka, obrázek 8 a 9 ukazuje elektrodu po zkušebním měření plátek uzenin.



Obr. 7 Elektrody po experimentu tvorby úsad mléka



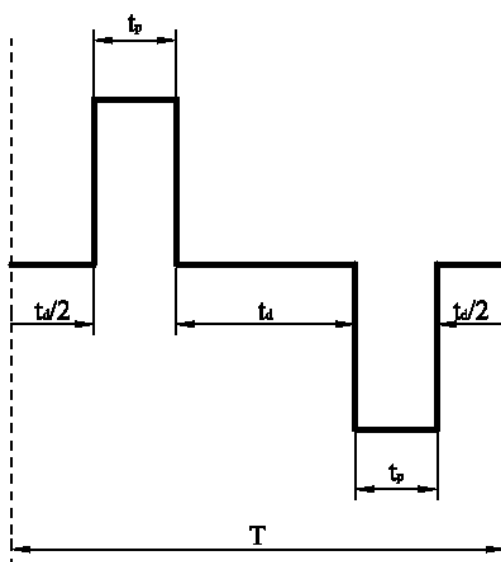
Obr. 8 Elektroda po ohřevu kousku uzeniny (nerez)



Obr. 10 Elektroda po ohřevu kousku uzeniny (titan)

Elektrochemickou korozi vznikající během ohřevu lze potlačit volbou velmi ušlechtilého materiálu elektrody (zlato, platina), nebo volbou vhodného časového průběhu elektrického proudu o frekvencích vyšších, než 50 Hz (řádově desítky kHz). Pozitivní efekt vyšší napájecí frekvence je znám již delší dobu - Samaranyake and Sastry (2005), detailnější studie prováděla Samaranyake et al. (2005).

K potlačení koroze elektrod je v rámci výzkumu vyvíjen nový napájecí zdroj, který umožní rovněž i nastavení časového průběhu elektrického proudu vhodným časováním napěťových pulsů – samotné pouhé zvýšení napájecí frekvence je nedostatečné. Nesprávnou volbou časování lze naopak docílit i urychlení elektrochemické koroze. Napájecí zdroj je založen na čtveřici MOSFET tranzistorů zapojených v plném mostu, jejichž činnost je řízena MOSFET kontrolérem. Požadovanou volbu časového průběhu elektrického proudu zajistí programovatelný mikroprocesor.

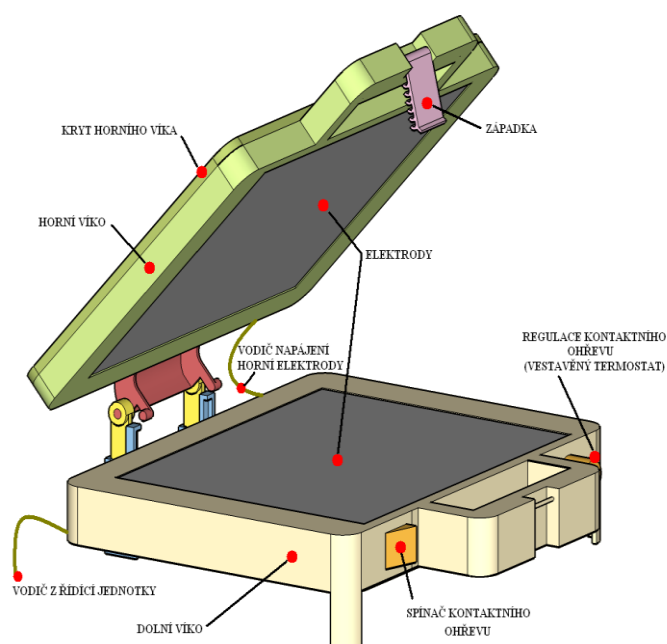


Obr. 11 časování průběhu elektrického proudu

4.3 Možnost průmyslové aplikace

Vhodné vlastnosti technologie přímého ohmického ohřevu nabízejí využití přímého ohmického ohřevu v oblasti sterilizace a pasterizace. V průmyslovém nasazení se předpokládá uplatnění v menších a středně kapacitních výrobnách. Praktické užití lze hledat např. mlékárnách.

Mimo sterilizaci a pasterizaci lze rovněž najít uplatnění např. v oblasti hromadného stravování a provozech fastfood, např. výroba hamburgerů. Takové zařízení je však nutno dovybavit i možností kontaktního ohřevu k vytvoření krusty na povrchu. Aplikátor v těchto provozech tak může mít podobu toasteru (obrázek 12) či varného hrnce – Kubíček (2008). Tato zařízení by byla vybavena napájecím pulsním zdrojem, který by zajistil (i monitoroval) vhodné operační parametry pro zrovna zvolenou potravinu.



Obr. 12 idea podoby zařízení pro výrobu hamburgerů určeného pro provozy fastfood.

5. Závěry

Provedené experimenty ukazují v případě tvorby úsad mléka na elektrodách silný vliv materiálu elektrod a hustoty elektrického proudu. I při ohřevu tuhých potravin přímým ohmickým ohřevem se objevuje kovový zápach ohřáté potraviny. Tyto výsledky ukazují na vznikající elektrochemickou korozi elektrod během přímého ohmického ohřevu. Určité potlačení koroze elektrod je možné vhodnou volbou časového průběhu elektrického proudu a frekvence napájecího napětí (v jednotkách kHz). Význam vlivu singularit v elektrickém poli při přímém ohmickém ohřevu není zcela objasněn a je předmětem současného výzkumu. V případě aplikace je technologie vhodná spíše do menších až středních průmyslových potravinářských provozů a uplatnění nalezne i v provozech hromadného stravování a rychlého občerstvení.

Symbolika

J	Proudová hustota	$[A.m^{-2}]$
P	Tlak	$[Pa]$
P	Elektrický příkon	$[W]$
S	Plocha	$[m^2]$
t	procesní čas	$[s]$
t_{lg}	lag-fáze (doba trvání lag-fáze)	$[s]$
T	Teplota	$[^{\circ}C]$
u	rychlost tekutiny	$[m.s^{-1}]$
U	Elektrické napětí	$[V]$

Literatura

Amatore, C., Berthou, M., & Hébert, S. (1998). Fundamental principles of electrochemical ohmic heating of solutions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 457(1-2), 191-203.

Assiry, A.M., Sastry, S.K., & Samaranayake, C.P. (2006). Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochemistry*, 68(1), 7-13.

Ayadi, M.A., Leuliet, J.C., Chopard, F., Berthou, M., & Lebouche, M. (2004). Continuous ohmic heating unit under whey protein fouling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(4), 465-473.

Icier, F., & Ilcali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, 38(10), 1135-1142.

Jong, P.d. (2004). *Modelling and optimization of thermal processes in the dairy industry* (2nd ed). Netherlands Institute for Dairy Research, Netherlands.

Jones, F. (1897). *Apparatus for Electrically Treating Liquids*. Fernando Jones. United States Patent Office. US Patent 592735 26.10.1897

Kubíček, J. (2008). Návrh zařízení pro přímý ohmický ohřev vybraných potravin. ČVUT, fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. Diplomová práce.

Samaranayake, C.P., & Sastry, S.K. (2005). Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 577(1), 125-135.

Samaranayake, C.P., Sastry, S.K., & Zhang, Q.H. (2005). Pulsed ohmic heating — A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing. *Journal of Food Science*, 70(8), 460-465.

Skudder, P., & Biss, C. (1987). Aseptic processing of food products using ohmic heating. *The Chemical Engineer*, 433, 26-28.

Stancl, J., Novy, M., & Zitny, R. (2008). Temperature non-uniformities and risk of overheating at a direct ohmic heating of foods. *Bulletin of Applied Mechanics*, North America, 4, dec. 2008. Available at: <http://bulletin-am.cz/index.php/vam/article/view/92>

Stancl, J., Zitny, R. (2009). Milk fouling at direkt ohmic rating. *Journal of Food Engineering*, in press.

Stirling, R. (1987). Ohmic heating—a new process for the food industry. *Power Engineering Journal*, 6, 365-371.

Toyoda, I., & Fryer, P.J. (1994). A computational model for reaction and mass transfer in fouling from whey protein solutions. In *Fouling and cleaning in food processing*, Jesus College Cambridge, UK.

Trpišovský, J. (2006). Návrh technologie přímého elektrického ohřevu kusových potravin. ČVUT, fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. Diplomová práce.

Zareifard, M.R., Ramaswamy, H.S., Trigui, M., & Marcotte, M (2003). Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(1), 45-55.

Zhang, L., & Fryer, P.J. (1993). Models for the electrical heating of solid-liquid food mixtures. *Chemical Engineering Science*, 48(4), 633-642.