

Využití termodynamických senzorů a elektronického nosu v oblasti monitorování a řízení procesů v potravinářství

Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Teze habilitační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Teze habilitační práce

**Využití termodynamických senzorů a elektronického
nosu v oblasti monitorování a řízení procesů v
potravinářství**

**The use of thermodynamic sensors and an electronic nose in the
field of monitoring and control of processes in the food industry**

Autor: **Ing. Martin Adámek, Ph.D.**

Studijní obor: Řízení strojů a procesů

Zlín, 2024

© Martin Adámek

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Habilitation Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2024.

Klíčová slova: Senzory, elektronický nos, termodynamické senzory, chemirezistivní plynové senzory, 3D tisk, kapilára, potravinářství, jedlý hmyz.

Key words: Sensors, electronic nose, thermodynamic sensors, chemiresistive gas sensors, 3D printing, the capillary, food industry, edible insects.

Plná verze habilitační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-287-7

ABSTRAKT

Předložená habilitační práce je souborem prací autora, které v době jejich vydání přinesly nové nebo rozšiřující vědecké poznatky o oblasti vlastností a použití elektronického nosu a termodynamických senzorů a jejich využití v potravinářství.

V oblasti termodynamických senzorů na principu bilanční rovnováhy (TDS) byla představena základní koncepce senzorů a hlavní vlastnosti, výhody a nevýhody těchto senzorů. V této části byl zpracován souhrn možností a využití těchto senzorů v potravinářských procesech a jejich automatizaci. Jedním ze stěžejních úkolů bylo řešení výrazné závislosti výstupního signálu senzoru na jeho konstrukčním uspořádání zařízení. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik experimentů se sledováním vlivu umístění čidel termodynamické soustavy u jednoduché reakční nádoby na výstupní odezvu senzoru.

Dále byla ukázána aplikace TDS v konkrétních oblastech potravinářství se zaměřením na fermentační procesy. Jako modelový experiment byla zvolena fermentace kvasinek v cukerném roztoku. Následně byly TDS aplikovány v procesech fermentace mléka, těsta a mladiny či v procesech srážení mléka při výrobě sýru. Výsledky ukazují možnost sledovat potravinářské procesy spojitě v čase, u kterých je daný stav procesu sledován často jen náročnějšími analytickými metodami. V této části jsou nastíněny i výhody monitorování těchto procesů a možnosti jejich automatizace. Zejména jde o zjištění konce fermentační fáze a možnosti včasného automatického ukončení probíhajícího procesu. Tento způsob by mohl významně přispět k šetření využívaných energií a jejich úsporám.

V oblasti elektronického nosu byly využity zejména chemorezistivní senzory v obdobných aplikacích jako senzory termodynamické. V úvodní části je zkoumána možnost charakterizace vzorku nejen z velikosti výstupní odezvy použitého senzoru ale i z časové závislosti této odezvy při průchodu vzorku 3D tištěnou kapilárou. Na základě tohoto výzkumu byla prokázána možnost zvýšení úrovně charakterizace a rozpoznávání vzorku pomocí časové oblasti za použití levných, snadno modifikovatelných, zařízení a časově nenáročných metod měření.

Zjištění stavu produkované potravinářské komodity a monitorování jejich změn v čase je jedna z klíčových otázek pro řízení procesů v produkci potravinářských komodit. Včasný regulační zásah může vést nejen ke zvýšení kvality potravinářské produkce, ale i úsporám energií potřebných ke zpracování potravinářské komodity, které jsou strategickou prioritou EU. V oblasti snížení spotřeby energie a omezení jejího plýtvání, které vedou nejen k dosažení udržitelných dodávek energie a snížení emisí skleníkových plynů, ale i k podpoře evropské konkurenceschopnosti, se nachází stále široký prostor pro další zlepšování řízení strojů a výrobních procesů.

ABSTRACT

The habilitation thesis consists of articles by the author, which at the time of their publication brought new or expanding scientific knowledge about the properties and use of electronic noses and thermodynamic sensors (TDS) and their applications in the food industry.

In the field of thermodynamic sensors based on the principle of balance equilibrium, the basic concept of the sensor and the main properties, advantages and disadvantages of these sensors were presented. In this section, the possibilities and use of these sensors in food processes and their automation were summarized. One of the key tasks was solving the significant dependence of the output signal on the structural arrangement of the device. For this reason, several experiments were conducted to monitor the influence of the thermodynamic system sensor's location on the output response of the sensor in a simple reaction vessel.

Furthermore, the application of TDS was shown on specific examples in the food industry with a focus on fermentation processes. Yeast fermentation in sugar solution was chosen as a model experiment. Subsequently, TDS were applied in milk, dough and wort fermentation processes or in milk coagulation processes during cheese production. The results show the possibility of continuous monitoring food processes in which the given state of the process is often monitored only by more demanding analytical methods. This section also outlines the advantages of monitoring these processes and the possibilities of their automation. In particular, it concerns the detection of the end of the fermentation phase and the possibility of early automatic termination of the ongoing process. This approach could, therefore, lead to saving of energy used for these processes.

Chemoresistive sensors were mainly used in the field of electronic noses in similar applications as thermodynamic sensors. In the introductory part, the possibility of characterizing the sample not only from the output response magnitude of the used sensor, but also from the time dependence of this response when the sample passes through the 3D printed capillary is investigated. Based on this research, the possibility of increasing the level of characterization and recognition of a sample using the time domain was demonstrated using inexpensive, easily modifiable, equipment and a time-saving measurement method.

Determining the state of the produced food commodity and monitoring its changes over time is one of the key questions for managing processes in the production of food commodities. Early regulatory intervention can lead not only to an increase in the quality of food production, but also to energy savings needed to process food commodities, which are a strategic priority of the EU. In the area of reducing energy consumption and limiting its wasting, which leads not only to achieving sustainable energy supplies and reducing greenhouse gas emissions, but also to supporting European competitiveness, there is still a wide scope for further improvement of the management of machines and production processes.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji institucím UTB ve Zlíně a VUT v Brně za poskytnuté zázemí pro moji vědeckou práci.

Děkuji spolupracující firmě HIT, s.r.o., Nedachlebice, Česká republika, která poskytla jako laskavost pro výzkum v oblasti monitorování procesů v potravinářském průmyslu základní princip termodynamických bilančních senzorů a některé senzory v počátečních fázích výzkumu. Zde bych chtěl vyzdvihnout zejména spolupráci s Ing. Michalem Řezníčkem, Ph.D., kterému děkuji za poskytnutou pomoc a cenné odborné rady.

Touto cestou bych rád poděkoval zejména prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc., a prof. Ing. Jiřímu Mlčkovi, Ph.D., za cenné poznatky a rady, které mi předali při zpracovávání uvedené problematiky.

Dále děkuji všem spolupracovníkům a kolegům, které jsem za život potkal, a kteří mi pomohli posunout se ve znalostech a zkušenostech o kus výš. Zejména bych chtěl vyzdvihnout doc. Ing. Ivana Szendiucha, CSc., a Ing. Editu Hejátkovou z Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT v Brně, kteří se stali mými učiteli na počátku mé vědecké kariéry a následně byli po dlouhá léta mými kolegy, prof. Ing. Petra Slobodiana, Ph.D., a jeho kolegy Ing. Jiřího Matyáše, Ph.D., a Ing. Roberta Olejníka, Ph.D., z Centra polymerních systémů, kteří řídili mé první kroky na UTB ve Zlíně, Bc. Ing. Magdalénu Zvonkovou a Ing. Nelu Skowronkovou z Ústavu analýzy a chemie potravin FT UTB ve Zlíně a Ing. Martina Búrana z Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT v Brně za podporu a pomoc při zpracování výsledků k této práci a všem ostatním kolegům, přátelům a známým za významnou pomoc a podporu jak v pracovním tak i v soukromém životě.

Nakonec bych rád poděkoval mé rodině, speciálně mé manželce doc. Ing. et Ing. Anně Adámkové, Ph.D., za veškerou pomoc a podporu v mém studiu a práci.

MOTIVACE

„Už jste někdy měřili zápach? Můžete mi říct, zda nějaký zápach je právě dvakrát silnější než druhý? Dokážete změřit rozdíl mezi dvěma druhy zápachu? Je zřejmé, že máme velmi mnoho různých druhů zápachů, od vůně fialek a růží až po vůni assa-foetida. Ale dokud můžete změřit jejich podobu a rozdíly, nemůžete mít žádnou vědu zápachu. Pokud jste ambiciózní a chcete najít novou vědu, měřte zápach.“

Alexander Graham Bell, 1914

OBSAH

OBSAH	6
SEZNAM VYBRANÝCH PUBLIKACÍ PRO HABILITAČNÍ PRÁCI	7
1. ÚVOD	9
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
2.1 Historie a využití elektronického nosu se zaměřením na potravinářské procesy	10
2.2 Princip a obecné vlastnosti termodynamických senzorů	11
2.2.1 <i>Stručný úvod do problematiky termodynamických senzorů</i>	11
2.2.2 <i>Základní princip termodynamických senzorů</i>	12
2.2.3 <i>Výhody a nevýhody TDS a jeho využití</i>	14
2.3 Elektronický nos a termodynamické sensory a jejich využití u potravin s jedlým hmyzem	14
2.3.1 <i>Charakteristika jedlého hmyzu</i>	14
2.3.2 <i>Využití elektronického nosu a termodynamických senzorů při produkci jedlého hmyzu</i>	15
3. CÍLE PRÁCE	16
4. LITERÁRNÍ REVIEW	17
4.1 Termodynamické senzory a jejich využití v potravinářských procesech	17
4.2 Elektronický nos a jeho využití v potravinářských procesech	33
4.3 Využití e-nosu a TDS v potravinářské praxi	39
5. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	40
6. ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	42
SEZNAM OBRÁZKŮ	48
SEZNAM TABULEK	50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50

SEZNAM VYBRANÝCH PUBLIKACÍ PRO HABILITAČNÍ PRÁCI

Vybrané publikace jsou nedílnou součástí plné verze habilitační práce.

A. Termodynamické senzory a jejich využití v potravinářských procesech

- A1. ADÁMEK, Martin; ŘEZNÍČEK, Michal a ADÁMKOVÁ, Anna, 2010. The Simple Thermodynamic Sensors for Process Monitoring in Milk Production. *ElectroScope*. č. 3, s. 1-3. ISSN 1802-4564. (hlavní autor, Jrec).
- A2. ADÁMKOVÁ, Anna; TANČINOVÁ, Dana a ADÁMEK, Martin, 2013. The Estimated Possibilities of Thermodynamic Sensors in Food Industry. online. In: *MendelNet 2013 – Proceedings of International PhD Students Conference*. Brno: Mendel University in Brno, s. 550-554. ISBN 978-80-7375-908-7. WOS:000366464800095.
- A3. ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVA, Anna; ŘEZNÍČEK, Michal a KOUŘIMSKÁ, Lenka, 2016. The estimated possibilities of process monitoring in milk production by the simple thermodynamic sensors. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 10, č. 1, s. 643-648. ISSN 1337-0960. (hlavní autor, Jsc)
- A4. ADAMEK, Martin; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; VOJACKOVA, Klara; FAMERA, Oldrich et al., 2020. Sensor Systems for Detecting Dough Properties Fortified with Grape Pomace and Mealworm Powders. *Sensors*. roč. 20, č. 12, s. 1-13. ISSN 1424-8220. (hlavní autor, Jimp)
- A5. ADAMEK, Martin; MATYAS, Jiri; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; BURAN, Martin et al., 2022. A Study on the Applicability of Thermodynamic Sensors in Fermentation Processes in Selected Foods. *Sensors*. roč. 22, č. 5, s. 1-16. ISSN 1424-8220. (hlavní autor, Jimp)
- A6. ADAMEK, Martin; ZVONKOVA, Magdalena; BURESOVA, Iva; BURAN, Martin; SEVCIKOVA, Veronika et al., 2023. Use of a Thermodynamic Sensor in Monitoring Fermentation Processes in Gluten-Free Dough Proofing. *Sensors*. roč. 23, č. 1, s. 1-17. ISSN 1424-8220. (hlavní autor, Jimp)
- A7. SEVCIKOVA, Veronika; ADAMEK, Martin; SEBESTIKOVA, Romana; BURESOVA, Iva; BURAN, Martin et al., 2024. New Insights into the Comprehensive System of Thermodynamic Sensors and Electronic Nose and Its Practical Applications in Dough Fermentation Monitoring. *Sensors*. roč. 24, č. 2, s. 1-15. ISSN 1424-8220. (Jimp)

B. Elektronický nos a jeho využití v potravinářských procesech

- B1. ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVÁ, Anna; BORKOVCOVÁ, Marie; MLČEK, Jiří; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al., 2017. Electronic nose in edible insects area. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 11, č. 1, s. 446-451. ISSN 1337-0960. (hlavní autor, Jsc)

- B2. ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVÁ, Anna; MLČEK, Jiří; BORKOVCOVÁ, Marie a BEDNÁŘOVÁ, Martina. Acceptability and sensory evaluation of energy bars and protein bars enriched with edible insect. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2018, roč. 12, č. 1, s. 431-437. ISSN 1337-0960. (hlavní autor, Jsc)
- B3. ADÁMEK, Martin; MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; BORKOVCOVÁ, Marie; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al. Unusual aspects of the fat content of mealworm larvae as a novel food. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2019, roč. 13, č. 1, s. 157-162. ISSN 1337-0960. (hlavní autor, Jsc)
- B4. ADAMEK, Martin; BURAN, Martin; REZNICEK, Michal; ADAMKOVA, Anna; BUCKOVA, Martina et al., 2021. The E-nose for Orientation Screening in the Food Industry. In: *2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. Bautzen, Germany, May 05-09, 2021. Bautzen, Germany: IEEE, NEW YORK, NY 10017 USA, 2021-5-5, s. 1-4. ISBN 978-1-6654-1477-7. ISSN 2161-2536. WOS: 000853459100008. (hlavní autor)
- B5. ADAMEK, Martin; MLCEK, Jiri; SKOWRONKOVA, Nela; ZVONKOVA, Magdalena; JASSO, Miroslav et al., 2023. 3D Printed Fused Deposition Modeling (FDM) Capillaries for Chemiresistive Gas Sensors. *Sensors*. roč. 23, č. 15, s. 1-17. ISSN 1424-8220. (hlavní autor, Jimp)

1. ÚVOD

Podle Akademického slovníku současné češtiny (ÚJČ AV ČR, 2017–2024) je pod pojmem „automatizace“ myšleno „*zavádění, zavedení, využívání, využití automatických, samočinných zařízení ve výrobě, ve službách ap.*“ S automatickými zařízeními je možné se dnes setkat ve všech oblastech lidské činnosti od výroby produktů a poskytování služeb, přes zařízení v domácnosti, až po zbraňové systémy či lékařská zařízení. Pro potřebnou reakci těchto zařízení na stav procesu nebo okolí je nutné propojení těchto systémů na citlivý prvek – senzor, který reaguje na požadované změny. V Malém encyklopedickém slovníku (Král, 1972) je pojem senzor definován jako „snímač popudů, zařízení, jímž se libovolná fyzikální veličina snímá a transformuje na veličinu jinou, snáze měřitelnou (obvykle elektrickou)“. Je proto zřejmé, že výsledkem transformace veličiny vstupující do senzoru nemusí být přímo elektrická veličina, ale veličina, která může být na elektrický signál transformována dalšími převody (Král, 1972).

To je případ i termodynamických systémů na principu bilanční rovnováhy (dále termodynamické senzory, TDS), které jsou dále uvedeny v práci. U nich je hlavní měřený jev (např. aktivita kvasinek) převeden na změny tepelného toku, a ty jsou následně převedeny u výstupního signálu na změny velikosti elektrického napětí U_{TDS} . To jim dává široké uplatnění v různých výrobních procesech.

Snižování energetické náročnosti u výrobních procesů v potravinářství, zvyšování kvality potravinářských produktů a sledování udržitelnosti potravinářských surovin a potravinářských výrobků jsou hlavními globálními cíli současných potravinářských výrob. Ve velkých výrobních, kde je kvalita výrobků často pečlivě sledována pomocí analytických metod, je monitorování potravinářské výroby a její regulace prováděna včas pomocí předem zavedených regulačních nástrojů. Avšak u malých až středně velkých provozoven může mít naplňování těchto cílů a požadavků na potravinářské výroby v důsledku současných krizí výrazný ekonomický dopad, který může být pro daný provoz až existenční (Večeřová, 2022; Svoboda, 2022). V důsledku současných krizí (zejména energetické a ekonomické) se zvýšila výroba potravinářských produktů i v mnoha domácnostech. Přestože zde nemusí být snaha po úplném ekologickém a ekonomickém řešení jednotlivých výrobních procesů ať už ze strany uživatelů potravinářských zařízení nebo jejich výrobců, neustále zde existují otázky ohledně trvanlivosti potravinářských výrobků a jejich bezpečné konzumace.

Zapojení termodynamických senzorů a elektronického nosu do monitorování a řízení potravinářských procesů může zejména v domácnostech a malých výrobních přispět k řešení těchto otázek. Předložená habilitační práce ukazuje základní princip TDS, shrnuje možnosti zlepšení TDS a elektronického nosu a na vybraných potravinářských procesech předkládá několik způsobů jejich využití. Práce ukazuje jejich použití v běžných potravinářských procesech, ale i za použití netradičních potravin (jedlý hmyz, netradiční potraviny rostlinného původu).

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Historie a využití elektronického nosu se zaměřením na potravinářské procesy

Myšlenka napodobit lidský nos a změřit určitou úroveň určitého pachu v okolí je již velmi stará. Pokrok v této oblasti je úzce spjat s rozvojem techniky, zejména s elektroanalytickou chemií, polovodičovými technologiemi, mikroelektronikou a trendem miniaturizace. První průlomovou událostí při vývoji elektronických nosů byl v roce 1954 vynález jednoduchého senzoru snímajícího aroma navrženého Hartmanem. (Rusinek et al., 2020) Dalším významným rokem byl rok 1982, kdy Persaud a Dodd z University of Warwick vyvinuli prototyp elektronického nosu (Persaud, Dodd, 1982), který následně uvedli na trh.

Termín „elektronický nos“ nebo „E-nos“ pro nástroj složený ze sady senzorů rozpoznávajících jednoduché a složité pachy formulovali v roce 1988 Gardner a Bartlett. Termín byl uveden v názvu konference v roce 1991 a rychle se ujal. Následně začal po celém světě vývoj této problematiky v různých odvětvích lidské činnosti (Stetter, Penrose, 2001; Hasil, 2011).

Využití elektrochemických senzorů ve formě elektronického nosu při stanovení nebezpečných látek v prostředí je jedním ze základních využití tohoto zařízení. Jeho využití je však daleko komplexnější – od zajišťování bezpečnosti a prevence kriminality, ochranu životního prostředí, přes aplikace v oblasti zdraví, výrobní procesy, až po kontrolu kvality různých surovin a výrobků (Bk, 2000). V potravinářských procesech může být e-nos použit např. v případech kontroly vůně potravin a jejich třídění, kontroly rybích výrobků, kontroly fermentačních procesů, kontroly žluknutí majonéz, monitorování sýření a zrání sýrů, kontroly tanků v pivovarech, třídění whisky (Bk, 2000) aj.

Úloha e-nosu v potravinářské výrobě může být obecně dvojího charakteru. V první oblasti úloh může e-nos doplnit nebo zcela nahradit postupy analytické chemie používané např. při kontrole procesu výroby, v druhé oblasti může doplnit nebo zcela nahradit práci kontrolora při senzorickém testování. V této oblasti je využití e-nosu dáno zejména jeho výhodami a nevýhodami oproti lidskému čichu posuzovatele senzoričtých vlastností dané komodity.

Posuzovatel dokáže rozeznávat pachy na základě znalostí, zkušeností (zejména pachové paměti daného člověka), trénovanosti a dalších vlastnostech. Schopnost čichu tak sebou přináší nevýhody ve formě subjektivity, přivyknutí na pachy, zaměnitelnosti pachů, aktuální únavě, komunikace mezi člověkem a ovládaným výrobním zařízením aj. (Panovská, b. r.), které při měření e-nosem nepředstavují problém. Zásadní výhodou e-nosu jsou možnosti automatizace, dlouhodobého monitorování spojitého v čase a zpracování informací o měřeném pachu.

Měření e-nosem však přináší nevýhody a problémy jiného rázu, jako je např. mobilita zařízení nebo citlivost na omezené množství plynů. Zatímco lidský čich dokáže rozeznat 4000-10000 pachů v závislosti na daném posuzovateli. (Panovská, b. r.; Patočka et al., 2006), u běžných e-nosů je prozatím dostupné

měření pouze vybraných skupin plynů. Navíc u přenosných e-nosů využívajících levná čidla může být smíchána v jednom výstupním signálu reakce i na několik plynů najednou. Příkladem mohou být levné chemorezistivní senzory, u kterých nelze jednoznačně určit, na který plyn daný sensor reaguje. Na daný plyn je možné usuzovat pouze za předpokladu, že ostatní plyny, na které sensor reaguje, se vyskytují v měřeném prostředí pouze v minimální koncentraci (Janošíková, 2022). Účelem této části práce je proto zvýšení pravděpodobnosti stanovení daného konkrétního plynu a jeho koncentrace. Zpřesnění detekce daných plynů a jejich koncentrací je možné provést:

- a) přidáním senzoru určeného pro snímání rušení pozadí pachů a jejich odečet od naměřených hodnot konkrétního plynu,
- b) změnou principu a konstrukce e-nosu,
- c) nově se rozvíjející umělou inteligencí.

2.2 Princip a obecné vlastnosti termodynamických senzorů

2.2.1 Stručný úvod do problematiky termodynamických senzorů

Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy mohou být použity pro sledování malých místních změn (minoritních událostí) v termodynamických soustavách. Sledování těchto změn může být, podle konstrukce senzoru, i nezávislé na změnách majoritních, které souvisí s plněním požadovaných funkcí dané soustavy. Sledování malých místních změn je v současné době neustále více požadováno z důvodu (Řezníček, 2014):

- a) poruch malých komponent (např. ložisek v motoru), které mohou způsobit nefunkčnost velké termodynamické soustavy,
- b) možnosti odhalení výskytu předpokládaných nežádoucích minoritních událostí, které lze v důsledku konstrukce zařízení očekávat. Tyto lokální minoritní události je však na pozadí hlavních majoritních událostí obtížné sledovat a vyhodnocovat klasickými metodami. Význam tohoto sledování však roste v důsledku rostoucích nároků na jakost a spolehlivost produktů,
- c) možnosti odhalení výskytu i neočekávaných nežádoucích událostí.

Soustava, ve které je požadováno sledování majoritních i minoritních událostí, musí často plnit zadané funkce v širokém rozsahu provozních podmínek. Jedná se zejména o velký rozsah okolních teplot, dlouhodobou stabilitu čidel teploty a jejich pravidelné metrologické ověřování a často i velkou tepelnou kapacitu soustavy, která zpomaluje sledované odezvy (Kalčík, 1963; Kheilová, 1998). Z těchto skutečností plynou omezení (Řezníček, 2014), které se týkají zejména dlouhodobé stability snímačů, citlivosti snímačů a rychlosti reakce snímačů.

Využití klasických teplotních snímačů při měření v oblasti nulových rozdílů teplot je zatíženo značnou chybou, která téměř znemožňuje určení jejich velikosti a orientace. Jedním z možných řešení těchto problémů je použití termodynamických snímačů v bilančních zapojeních (Řezníček, 2014).

2.2.2 Základní princip termodynamických senzorů

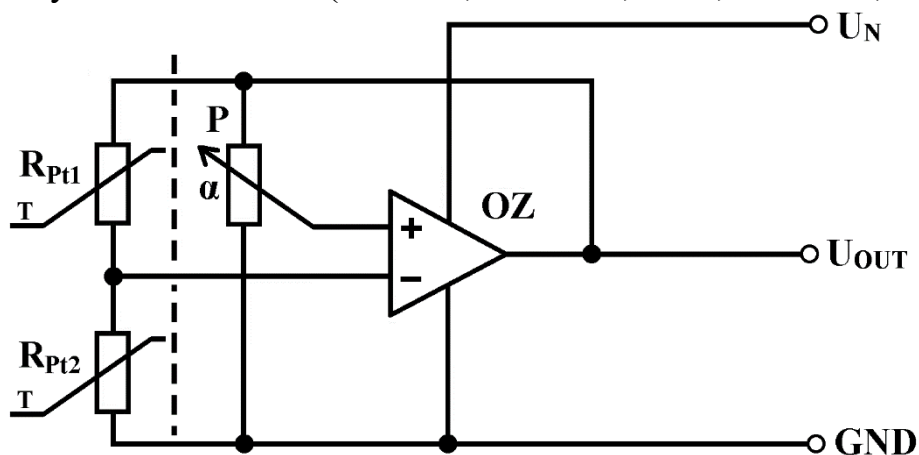
Základní princip, základní model a teorie ideálního termodynamického senzoru, který je integrován jako ideální element ve velkých modelech termodynamického systému, jsou popsány v (Řezníček, 2006). Originální teorie ideálního termodynamického senzoru jako zařízení pro monitorování procesů a energetickou aktivitu médií je popsána v (Řezníček, 2005; Řezníček et al., 2005; Řezníček et al., 2006; Řezníček et al., 2008).

Termodynamický senzor je aktivní prvek termodynamické soustavy. Jeho konstrukční uspořádání jednoznačně určuje předpis dodávky energie tak, aby byla nastavena nebo udržena jemu vlastní bilanční rovnováha s okolní tepelnou soustavou s tendencí k ustálení této rovnováhy. Zapojení zajišťuje podle bilančního předpisu takovou dodávku energie, která má zajistit udržení bilanční tepelné rovnováhy mezi senzorem a okolní termodynamickou soustavou, a to v závislosti na jejich okamžité vzájemné interakci (Adámek, Řezníček, 2013).

Termodynamické senzory se v praxi nejčastěji dělí do dvou základních skupin (1. a 2. řádu) podle principu jejich funkce. Senzory 1. řádu je možné využít jako velmi citlivý teplotní senzor pro snímání a regulaci teploty. U tohoto typu TDS je snímač definován jediným významně teplotně závislým rezistorem R_{Pt1} (termistor, senzor Pt100 nebo Pt1000 aj.) a jedním teplotně téměř nezávislým rezistorem R_1 , které tvoří napěťový dělič. Napětí na tomto děliči je snímáno operačním zesilovačem OZ, který následně zpětně řídí napětí na odporovém děliči. Teplotu TDS je možné podle potřeby přenastavit polohou α u jezdece potenciometru, který je připojen na druhý vývod operačního zesilovače. Výstupní napětí U_{OUT} nese informaci o stavu termodynamické soustavy ve formě skalární stavové veličiny (Adámek, Řezníček, 2013; Řezníček, 2014).

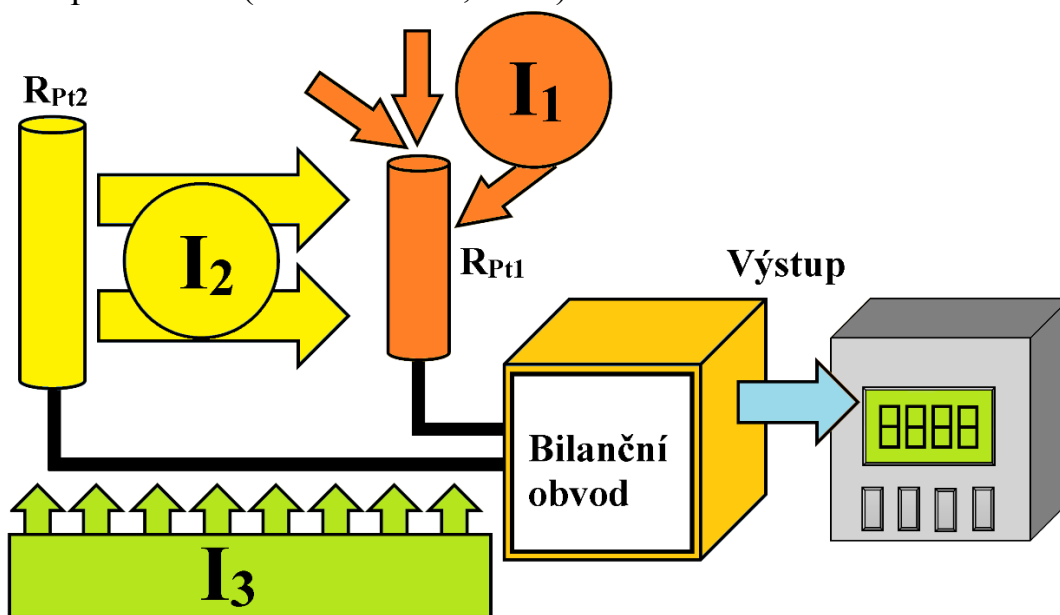
Termodynamické senzory 2. řádu jsou mnohem více využívanou skupinou. V tomto systému, Obr. 2.1, je termodynamický senzor rozdělen na dvě části, které jsou umístěny v různých částech termodynamické soustavy. V obou částech termodynamické soustavy je umístěn jeden teplotně proměnný rezistor (R_{Pt1} a R_{Pt2}). Je ideální, pokud mají oba rezistory shodný teplotní koeficient odporu, a pokud rezistor R_{Pt2} má větší hodnotu odporu zaručující tendenci k ustalování bilanční rovnováhy. Ostatní komponenty představují bilanční zapojení, které udržuje mezi oběma částmi systému (R_{Pt1} a R_{Pt2}) zdánlivý teplotní rozdíl, jenž je udržovaný dodávkou energie z bilančního zapojení. Operační zesilovač vždy dodá právě a jen přesně takový potřebný výkon k udržení termodynamického senzoru na přednastaveném stálém rozdílu teplot, který bývá vzhledem k teplotě okolí minimální. Žádaný rozdíl teplot mezi jednotlivými částmi senzoru je možné nastavit polohou α u jezdece potenciometru P. Tím se obě části TDS stávají dvojicí prvků soustavy, které zůstávají vůči sobě v ustáleném stavu bez ohledu na aktuální stav soustavy. Energie, která je nutná na udržení tohoto stavu (reprezentována napětím U_{OUT}), je možné považovat za měronosnou veličinu (vektorový charakter) charakterizující okamžitý stav termodynamické soustavy v bezprostředním okolí termodynamického senzoru. Zachycené změny napětí

U_{OUT} reprezentují změny teplotního toku mezi jednotlivými snímači, způsobené různými vlivy v okolí snímačů (Adámek, Řezníček, 2013; Řezníček, 2014).



Obr. 2.1: Schematické uspořádání vztažného termodynamického senzoru v bilančním zapojení (demonstrace principu). Upraveno dle (Adámek, Řezníček, 2013).

Vlivy působící na TDS je možné obecně rozdělit do tří základních skupin (Obr. 2.2). První skupinou vlivů jsou vlivy I_1 , které působí přímo pouze na teplotu T_1 snímače R_{Pt1} . Do této skupiny vlivů patří teplota, sálavé teplo, vlhkost, tok kapalin a další fyzikální veličiny, které je možné transformovat na tepelnou energii. Druhou skupinou vlivů jsou vlivy I_2 , které mění teplotní vlastnosti prostředí mezi snímači R_{Pt1} a R_{Pt2} . V této skupině vlivů je teoreticky možné měřit veličiny jako objem, hustota, tok kapalin, tlak a další fyzikální veličiny. Poslední skupinou vlivů jsou vlivy I_3 , které působí najednou na teplotu obou snímacích elementů R_{Pt1} a R_{Pt2} . Pokud dojde ke stejnému teplotnímu působení na oba snímače a snímače budou mít vhodný teplotní koeficient odporu, teplotní rozdíl mezi nimi se nemění a daný vliv nepůsobí na výstupní napěťový signál TDS. Do této skupiny je např. řazena teplota okolí (Adámek et al., 2016).



Obr. 2.2: Skupiny vlivů, které působí na termodynamický senzor. Upraveno dle (Adámková et al., 2013).

2.2.3 Výhody a nevýhody TDS a jeho využití

Jednou ze zásadních výhod TDS je možnost jejich použití pro sledování a identifikaci minoritních událostí, které by na pozadí velkých událostí bylo obtížné zaznamenat. Z technického hlediska se mezi výhody řadí zejména možnost měření tepelného toku, směrovost měření a možnost monitoringu při téměř nulovém teplotním rozdílu mezi snímači. Další výhodou přináší možnost snadného připojení k řídicím a regulačním obvodům. Významnou výhodou je i finanční nenáročnost těchto senzorů (Adámek et al., 2016).

Využití TDS však přináší i nevýhody, mezi které hlavně patří poskytování informace pouze o relativních změnách teploty/tepelného toku. Měření je dále velmi závislé na návrhu a konstrukci měřicího systému v konkrétní aplikaci.

Základní princip termodynamických senzorů může být využit v mnoha oblastech při monitorování a řízení procesů. Bylo dokumentováno např. využití TDS při sledování lomu skelných vláken při jejich výrobě, sledování třecího tepla v motoru čerpadla, sledování přijímaného signálu na anténě nebo teplotní stabilizace detektoru nanočástic (Řezníček, 2014). Dále byly popsány aplikace v oblasti potravinářského průmyslu, zejména monitorování různých fermentačních procesů. Tyto experimenty jsou blíže popsány níže v aplikační části.

2.3 Elektronický nos a termodynamické sensory a jejich využití u potravin s jedlým hmyzem

2.3.1 Charakteristika jedlého hmyzu

Jedlý hmyz byl z důvodu snadného ulovení jednou z prvních živočišných složek lidské stravy. Přestože hmyz konzumuje v současnosti více než 2 miliardy lidí a je rozšířen ve více než 130 zemích světa, ve vyspělých zemích Evropy a Ameriky se veřejnost ke konzumaci hmyzu staví spíše negativně. Hmyz byl od středověku považován za jídlo spojované s chudobou a nemocemi. Výhodami hmyzu jsou však proti jiným hospodářským zvířatům (Huis et al., 2013):

- vysoká konverze krmiva na výrobu 1 kg živočišné bílkoviny,
- menší množství vody na výrobu 1 kg živočišné bílkoviny,
- menší plocha potřebné půdy pro chov a možnost chovu v patrech,
- významně menší produkce skleníkových plynů a amoniaku, a s tím spojené nižší znečišťování životního prostředí.

Dalšími výhodami jsou obnovitelnost zdroje potravy, dobré nutriční hodnoty hmyzu srovnatelné s konvenčními komoditami živočišného původu, možnost konverze organického odpadu pomocí hmyzu, nízké riziko přenosu zoonoz, technická i ekonomická nenáročnost a možnost chovu hmyzu i v nejchudších vrstvách společnosti obyvatel venkova a města (Huis et al., 2013).

Pro výše uvedené značné výhody se nejenom postoj odborné, ale i laické veřejnosti v posledních letech začal měnit (Zielińska et al., 2015) a jedlý hmyz se

začíná stávat zajímavým artiklem a jedním z gurmánských trendů (Ramos-Elorduy, Menzel, 1998). Z důvodu nedostatečné konkurence chovatelů jedlého hmyzu v Evropě se ale cenové podmínky prodeje pro konečného spotřebitele stávají nevýhodné až odrazující. Pro své výhody je podle Organizace pro výživu a zemědělství (FAO UN) hmyz považován za potravinu budoucnosti, zejména jako výhodný alternativní zdroj bílkovin. Mimo to jsou považovány za významné i environmentální a ekonomické přínosy chovu hmyzu, které mohou přispět ke snížení hladu v rozvojových zemích, snižování plýtvání potravinami (Mancini et al., 2019) a ke zvýšení úrovně ekologie a udržitelnosti, jako jednoho z klíčových bodů na úrovni vládní i evropské politiky.

Chov hmyzu má však i své negativní stránky. Nevýhodami konzumace hmyzu mohou být riziko alergie na jedlý hmyz, možná toxicita nebo rizika spojená s nevhodnou přípravou a kulinární úpravou (obstipace aj.). Všem uváděným rizikům mimo rizik závislých na spotřebiteli je však možné předcházet zavedením vhodných zásad správné zemědělské a výrobní praxe a bezpečnostních systémů (např. HACCP) obdobně jako u jiných hospodářských zvířat (MZe ČR, 2018).

2.3.2 Využití elektronického nosu a termodynamických senzorů při produkci jedlého hmyzu

Z důvodu automatizovaných chovných podmínek a zavádění vhodných zásad správné zemědělské a výrobní praxe a bezpečnostních systémů je pro jejich kontrolu a ověřování možné využít obdobně jako u jiných hospodářských zvířat elektronických senzorických systémů pro kontrolu a monitorování jednotlivých stavů v chovu. Chov hmyzu však může mít oproti běžnému chovu jiných hospodářských zvířat určitá specifika. Produkce, třídění a zpracování hmyzu může být prováděno v automatizovaných halách, kde jsou umístěny chovné boxy do výšky několika metrů nad sebou.

Pro toto monitorování a kontrolu jednotlivých stavů v chovných boxech mohou být využity i systémy elektronického nosu a termodynamických senzorů s návazností na další automatizované systémy. Příkladem může být specifický zápach z uhynulých jedinců nad stanovenou mez, který může být zjišťován pomocí elektronického nosu s možnou návazností na třídící automatiku. Obdobně může být sledována koncentrace plynů v chovném prostoru s napojením na automatickou ventilaci vzduchu nebo teplotní podmínky v chovu pomocí termodynamických senzorů.

Elektronický nos je však možné použít nejen v případě jedlého hmyzu, ale i v případech, kdy je hmyz škůdcem v prvovýrobě potravinářských komodit nebo v produkci potravin. Jsou známé informace o využití elektronického nosu při odhalování škůdců v květech bavlníku, palmovém dřevu nebo rýži (Rodríguez Méndez, Preedy, 2016).

3. CÍLE PRÁCE

Souhrnným cílem habilitační práce je rozšířit a prohloubit znalosti o senzorech na principu termodynamické bilanční rovnováhy a jejich využití v oblasti monitorování a řízení procesů v potravinářství. Dalším cílem práce je rozšířit a prohloubit znalosti o možnostech využití levných elektrochemických senzorů použitých jako vstupní jednotky pro elektrochemický nos (dále e-nos) v oblasti potravinářství.

Konkrétní cíle práce vychází z existence dosud nevyjasněných otázek, mezi které patřily zejména:

- znalost chování TDS při monitorování procesů v potravinářství a možnosti jejich uplatnění se zaměřením na fermentační a procesy sýření,
- možnosti a využití levných chemorezistivních senzorů u e-nosu pro monitorování a řízení potravinářských procesů,
- možnosti a využití e-nosu a TDS pro monitorování a řízení potravinářských procesů, ve kterých se používají netradiční potravinářské komodity.

Cíle práce je možné proto rozdělit na oblast TDS a oblast e-nosu. Protože však byly oba způsoby často aplikovány při monitorování daného procesu najednou (často u procesů využívajících netradičních potravinářských komodit), lze jednotlivé oblasti považovat za úzce provázané a navzájem se překrývající a prolínající. Vzhledem k následnému publikování v rámci jednoho publikačního výsledku, nelze proto striktně vymezit jednotlivé publikační výsledky odpovídající pouze jediné oblasti.

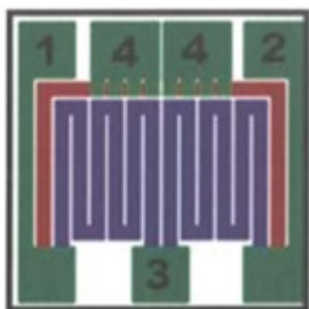
Dalším cílem habilitační práce je přispět k dalšímu rozvoji problematiky elektrochemických a termodynamických senzorů v oboru technologií zpracování potravin a přinést nové náměty pro další studium a experimentální činnost.

4. LITERÁRNÍ REVIEW

4.1 Termodynamické senzory a jejich využití v potravinářských procesech

Výzkum v oblasti termodynamických senzorů byl řešen jak v oblasti základního výzkumu, tak zejména v oblasti aplikovaného výzkumu v potravinářských procesech. V oblasti základního výzkumu bylo snahou charakterizovat chování termodynamického systému při jeho různých modifikacích. Zejména šlo o polohu jednotlivých čidel v termodynamickém systému nebo o jejich konstrukci. V úvodních částech výzkumu bylo při vývoji senzorů a měření úzce spolupracováno s firmou HIT, s.r.o., Nedachlebice, Česká republika, která poskytla základní know-how pro výzkum v oblasti monitorování procesů v potravinářství.

Protože byl výzkum směřován hlavně k využití v potravinářských fermentačních procesech, byla jako hlavní materiál volena tekutina, ve které byla čidla umístěna. První charakterizace byla prováděna v systému, kde byly tekutiny odděleny a jako čidlo bylo použito platinové čidlo vyrobené technologií tlustých vrstev, viz obrázek Obr. 4.1 a Obr. 4.2, (Adámek et al., 2010).

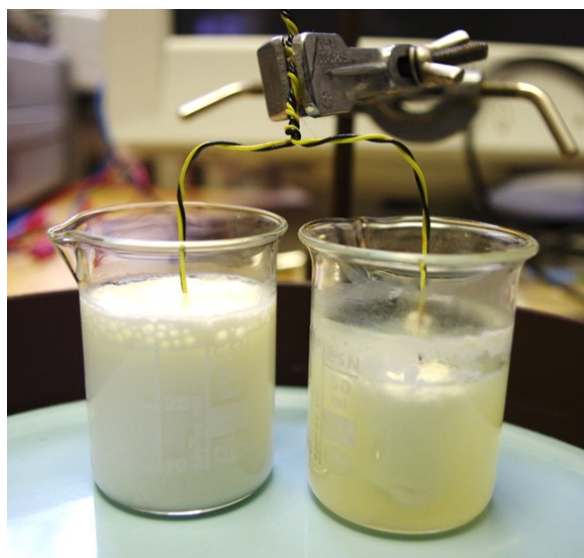


a) Návrh



b) Reálný vzorek

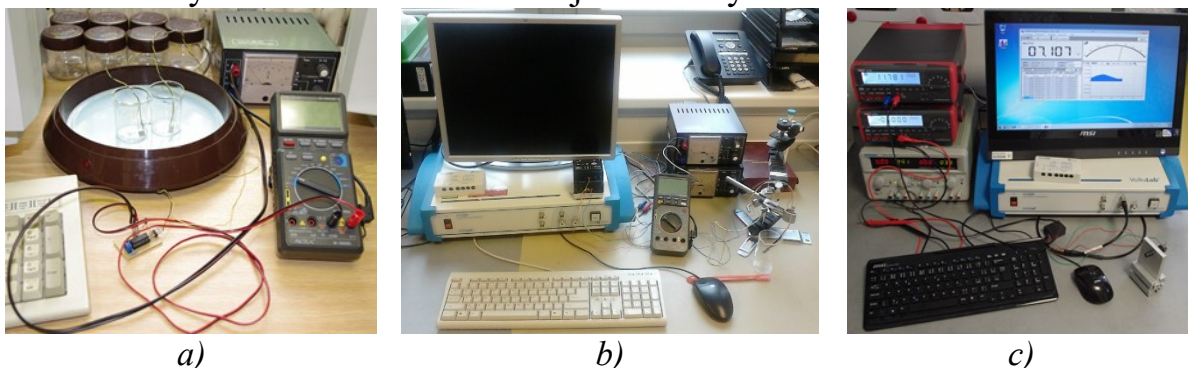
Obr. 4.1 : Termodynamický senzor vyrobený na korundovém substrátu s platinovou odporovou vrstvou (Adámek et al., 2010).



Obr. 4.2: Umístění čidel v oddělených tekutinách (foto autor).

Mimo měření s vyrobenými platinovými senzory byly následně experimenty prováděny i s komerčně vyrobenými čidly (nejčastěji platinová čidla Pt100 a Pt1000 nebo polovodičová čidla KTY81-110 a KTY81-210). Jako velmi kvalitní ochrana kontaktů těchto čidel před vlhkostí se ukázalo zalévání do pouzdrících plastických hmot pro hybridní integrované obvody, u kterého však bylo při ruční výrobě nanášeno na pouzdro různé množství plastické hmoty. To mělo dopad nejen na tvar vyrobeného čidla, ale hlavně na velikost jeho tepelné kapacity. Nevýhodou byla i neopravitelnost. Jednodušším a opravitelným postupem bylo vložení senzoru do vhodně veliké teplem smrštitelné bužírky a její aplikace. Tohoto postupu bylo použito u většiny dále uváděných měření.

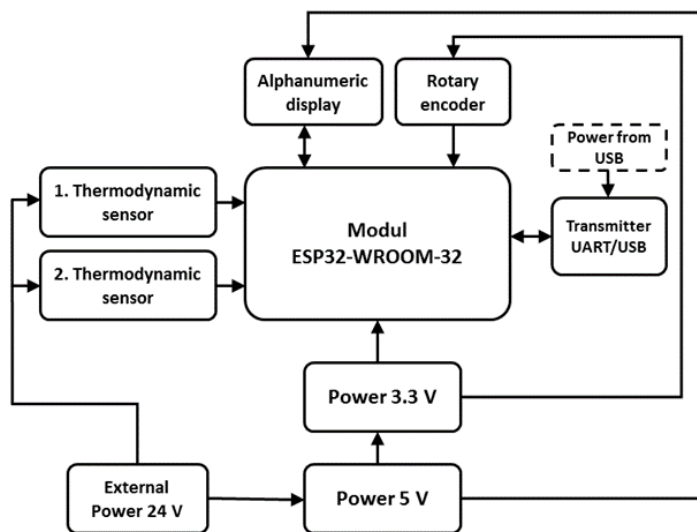
Postupným vývojem procházelo nejen samotné čidlo, ale i měřicí stanoviště a s ním i vývoj měřicích zařízení. Jedny z prvních měřicích pracovišť jsou ukázány na Obr. 4.3. Poloha pracoviště byla volena podle aktuálních dostupných možností a byla důležitá z důvodu vnějších rušivých vlivů.



Obr. 4.3 : Jedny z prvních měřicích pracovišť v autorově výzkumu pro měření s termodynamickými senzory na principu bilanční rovnováhy (foto autor).

Měřicí obvod pracoval nejčastěji s integrovaným operačním zesilovačem typu 1458 nebo L272M, který dokázal dodat přímo z operačního zesilovače proud až 0,7 A. Výstupní napětí z měřicího obvodu bylo nejčastěji snímáno multimetrem UT 71 D, Metex 3270 D nebo Almemo 2390-5 (Adánek et al., 2010; Adámková et al., 2013; Adánek et al., 2016). Následně byly vytvořeny přípravky s využitím mikropočítačů řady Atmel ATmega 328 a ATmega 2560 (Microchip Technology Inc.). Mezi poslední se řadí přípravky založené na mikropočítači ESP32 (Espressif Systems), Obr. 4.4, které umožňují připojení více termodynamických systémů najednou a přímou bezdrátovou komunikaci pomocí WiFi (Adamek et al., 2020; Adamek et al., 2022; Adamek et al., 2023). To je výhodné zejména při připojení TDS do měřicích a regulačních systémů bez nutnosti kabelového připojení a do prostředí, které může být i pro člověka nebezpečné.

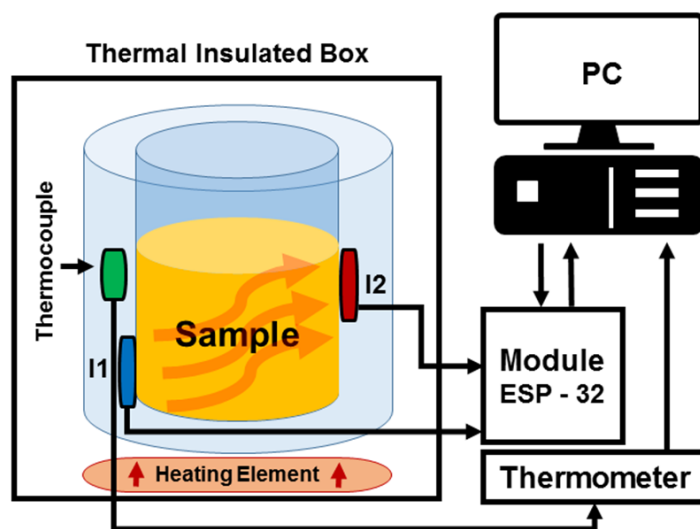
S postupným zdokonalováním měřicích systémů docházelo i k změnám uspořádání a konstrukci senzorů – od měření ve dvou samostatných nádobách přes měření s čidly nad sebou v jedné nádobě až po čidla umístěné vně reakční nádoby, Obr. 4.5. Výhodou tohoto uspořádání je jejich aplikace bez narušení a zasahování do probíhajícího procesu. Nevýhodou je však nižší citlivost na změny monitorovaného procesu (Adamek et al., 2022). Měřicí obvod může mít ale přepínatelné zesílení, které může tuto nevýhodu částečně kompenzovat.



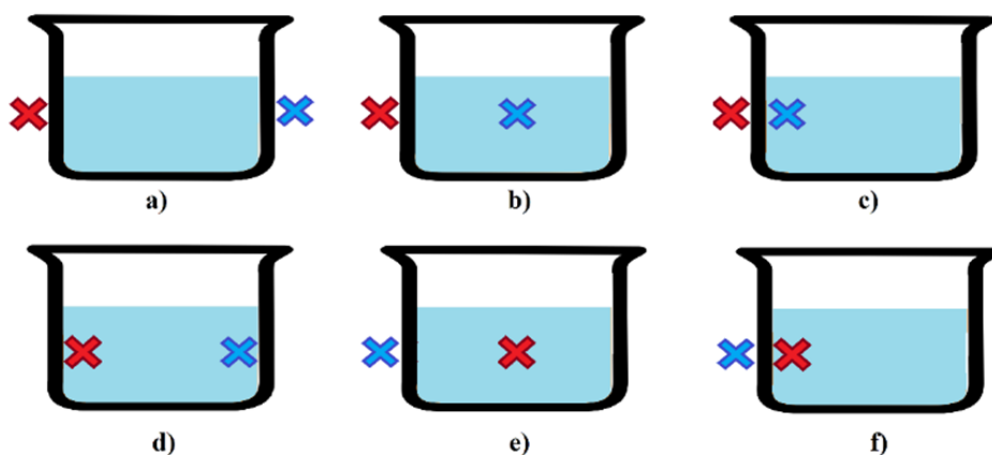
a) Blokový diagram

b) Prototyp měřicí jednotky

Obr. 4.4 : Měřicí přípravek založený na mikropočítači ESP32 (Adamek et al., 2022).

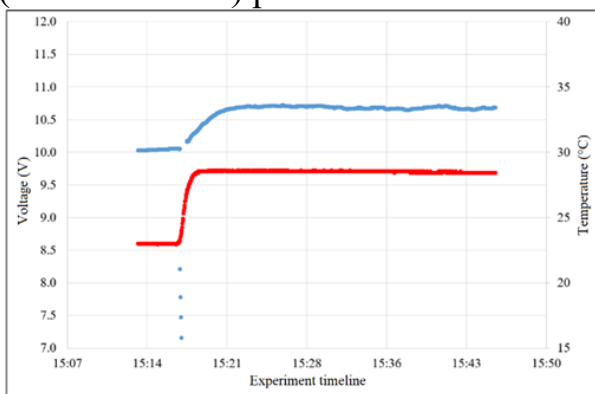


Obr. 4.5: Schéma konstrukce termodynamického systému s čidly umístěnými vně měřicí nádoby (Adamek et al., 2022).

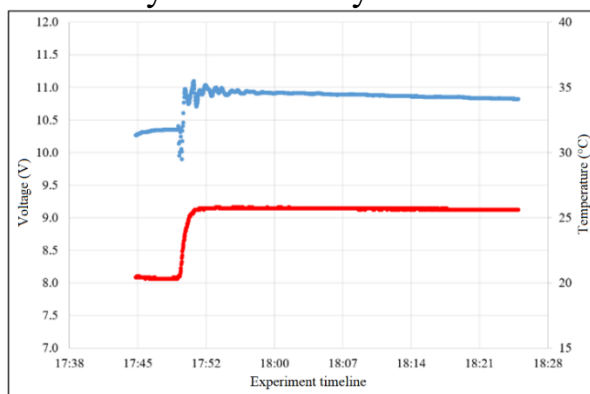


Obr. 4.6: Různé umístění jednotlivých čidel TDS vůči nádobě. Křížky znázorňují polohu čidla T1 (červený křížek) a čidla T2 (modrý křížek) (Adamek et al., 2022).

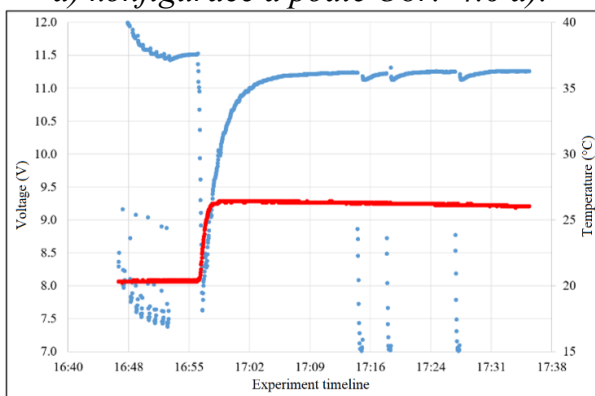
Umístění jednotlivých čidel vzhledem ke zdroji změny tepelného toku bylo zkoumáno ve dvou základních případech – změna pozice senzorů vzhledem k měřicí nádobě a změna pozice skokového přídavku tepelné energie. Změna testované pozice čidel vzhledem k měřené nádobě je ukázána na Obr. 4.6 a Obr. 4.7. Křížky na Obr. 4.6 znázorňují polohu čidla T1 (červený křížek) a čidla T2 (modrý křížek) vůči nádobě. Na Obr. 4.7 je ukázána výstupní odezva termodynamického systému (modrá křivka) a klasického teplotního čidla (červená křivka) při různém umístění čidel termodynamického systému.



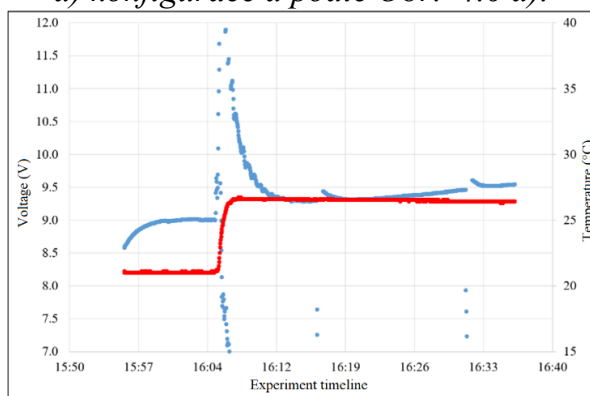
a) konfigurace a podle Obr. 4.6 a).



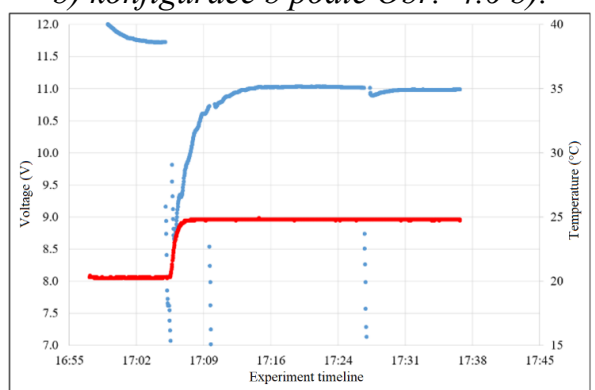
d) konfigurace d podle Obr. 4.6 d).



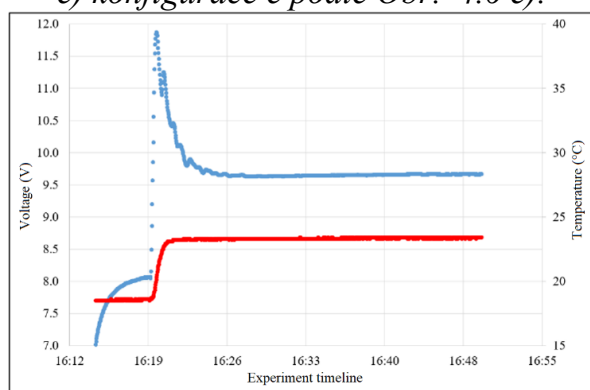
b) konfigurace b podle Obr. 4.6 b).



e) konfigurace e podle Obr. 4.6 e).



c) konfigurace c podle Obr. 4.6 c).



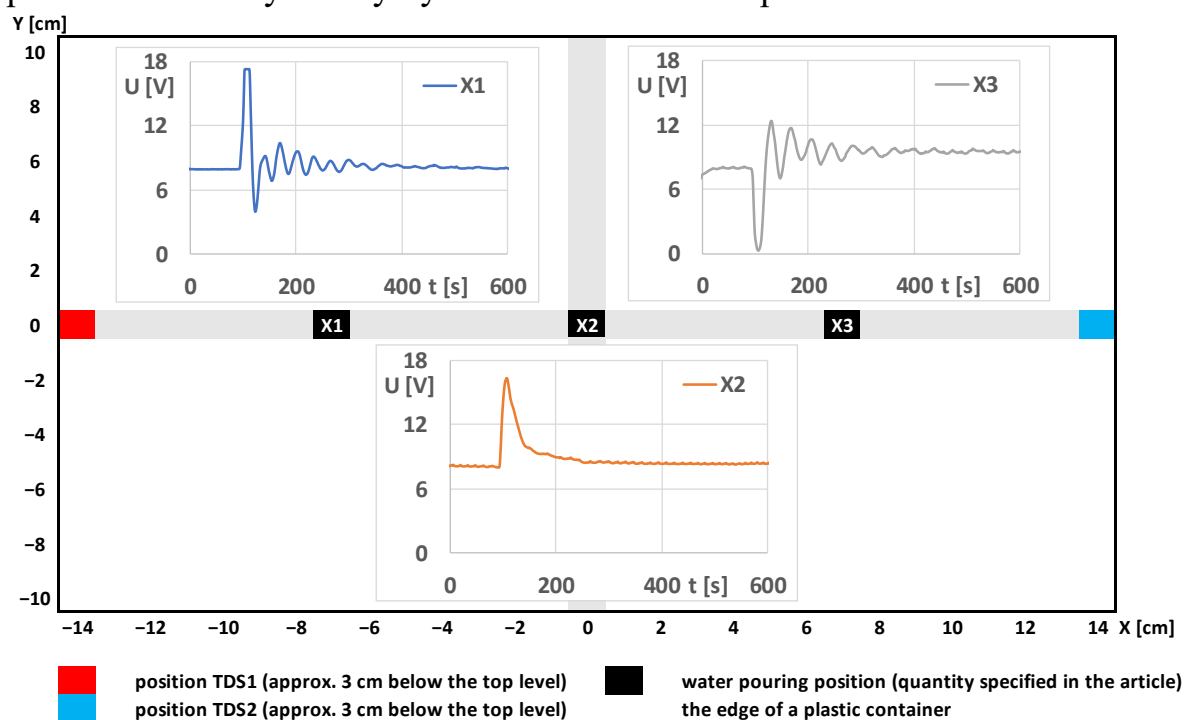
f) konfigurace f podle Obr. 4.6 f).

Obr. 4.7: Výstupní odezva TDS (modrá) a klasického teplotního čidla (červená) při různém umístění čidel termodynamického systému. Písmenné značení odpovídá písmennému značení pozic na Obr. 4.6 (Adamek et al., 2022).

Tento pilotní experiment ukázal značnou závislost maximálního výstupního signálu na umístění těchto senzorů v termodynamickém systému. Výsledky

potvrzují nejnižší monitorovanou odezvu při umístění čidel na bocích nádoby (konfigurace a) a d)). Výstupní signál z konfigurace a), ve které jsou navíc snímače umístěny z vnějšku nádoby, je utlumen a nemá rušivé zákmity. V ostatních konfiguracích je reakce výstupního signálu na tepelný pulz několikanásobně vyšší. Jejich nevýhodou je nutné umístění snímače uvnitř nádoby. To přináší obtíže v konstrukci nebo i negativní vliv na probíhající proces. Navíc u konfigurace c) a f), kdy jsou snímače ve stejném místě na stěně, pouze jeden vně a druhý uvnitř nádoby, se předpokládá ovlivnění výstupního signálu hlavně parametry stěny nádoby jako hlavními faktory, které působí na výstupní signál. Na základě předchozích úvah byly konfigurace b) a e) vybrány jako jedny z nejlepších. V těchto konfiguracích je významná hlavně změna teplotních podmínek v měřené kapalině, zatím co u konfigurací a) a d) je zaznamenán hlavně plynulý nárůst teploty kapaliny, obdobně jako klasického teploměru.

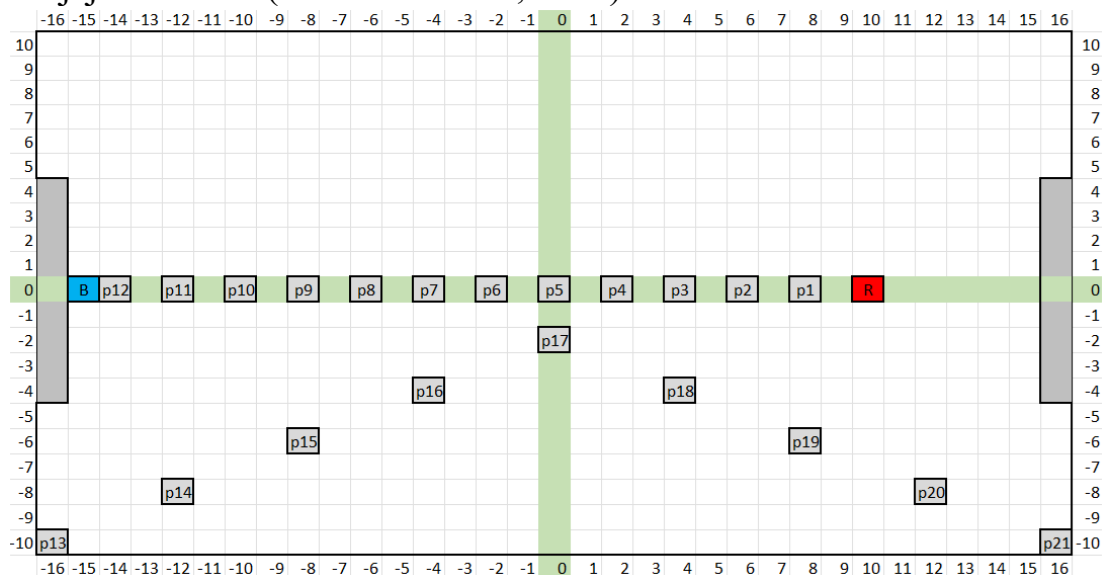
Tyto výsledky byly naměřeny ve vodě ve skleněné nádobě a s výše uvedenou specifickou konfigurací senzorů. Pokud by proces měření probíhal v jiné nádobě s jinou kapalinou, vlastnosti tepelného toku mezi čidly budou ovlivněny tepelnými vlastnostmi materiálu této nádoby a kapaliny. V některých případech tak může být sensorový systém citlivější, v jiných může reagovat se větším zpožděním nebo být náchylný ke snímání okolních podmínek.



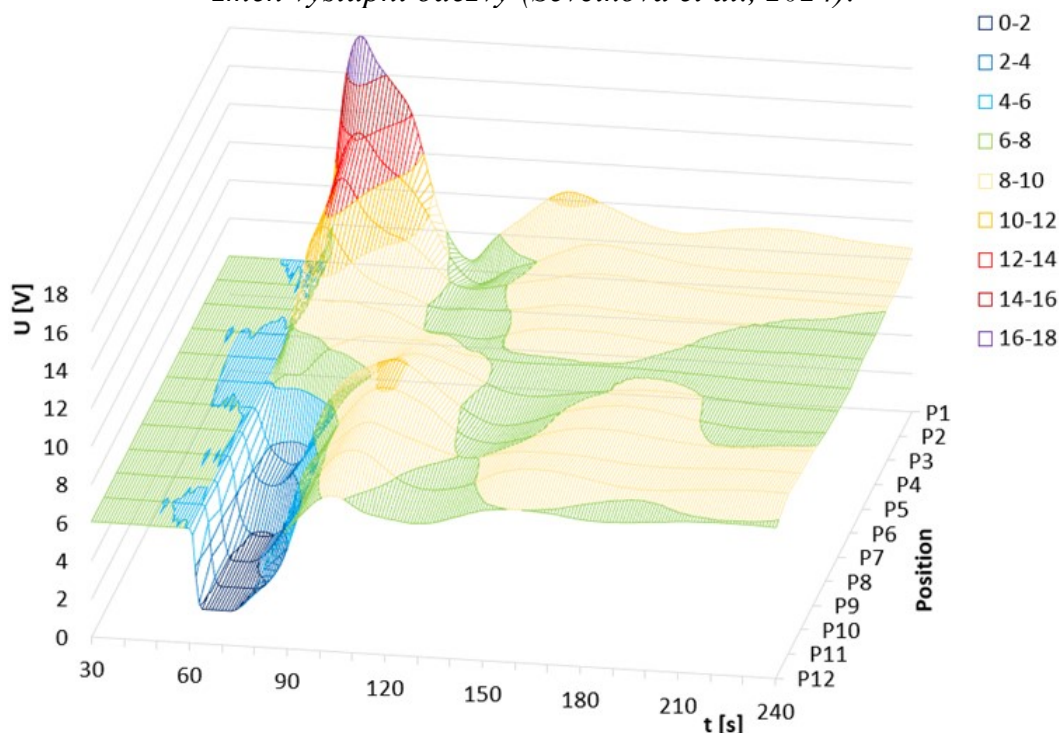
Obr. 4.8: Výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (X1 – modrá křivka, X2 – oranžová křivka, X3 – šedá křivka) se senzory zapojenými podle konfigurace d) na Obr. 4.6 (Adamek et al., 2022).

Ve druhém pilotním experimentu (Obr. 4.8) uvedeném v (Adamek et al., 2022) byla zkoumána závislost výstupního signálu na pozici zdroje tepla při stejné konfiguraci elektrod. Při prvním měření, které probíhalo souběžně s předchozím experimentem, byly snímače umístěny podle konfigurace d) na Obr. 4.6.

Po zpřesnění pozice z prvního pilotního experimentu byla zvolena konfigurace (Obr. 4.9), kdy snímač TDS2 (na obrázcích modře) byl umístěn z vnitřní stany na stěně nádoby a snímač TDS1 (na obrázcích červeně) umístěn od okraje nádoby blíže k jejímu středu (Sevcikova et al., 2024).



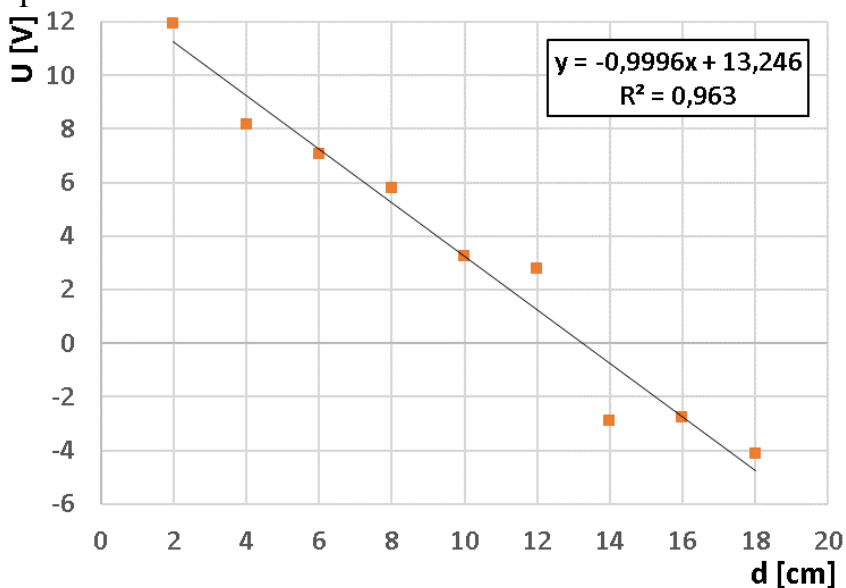
Obr. 4.9: Pozice zdroje tepla (p1 - p21) po upřesnění konfigurace čidel TDS k měření změn výstupní odezvy (Sevcikova et al., 2024).



Obr. 4.10: Upřesněná průměrná výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (p1 – p12) (Sevcikova et al., 2024).

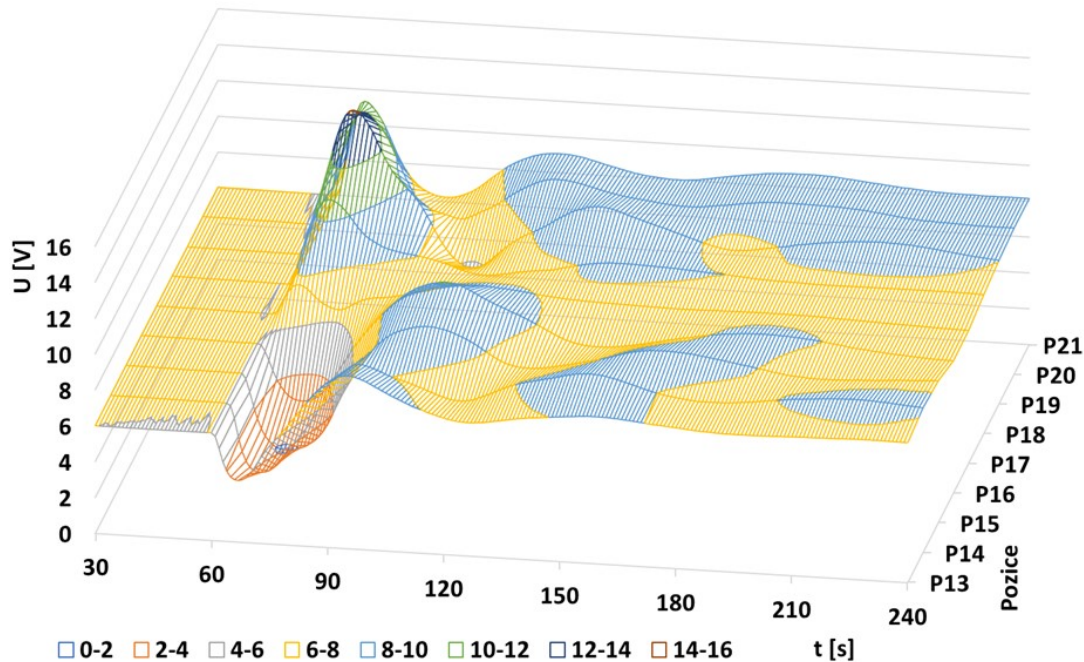
Obr. 4.10 ukazuje upřesněnou průměrnou výstupní odezvu termodynamického systému v přímém směru mezi snímači TDS1 a TDS2. U pozice p10 – p12 je první pík na křivce omezen napájecím napětím zdroje. Výsledky hodnoty prvního píku z ostatních pozic je možné vložit do grafu, Obr. 4.11, a proložit pomocí lineární regrese přímkou, u které byl zjištěn koeficient determinace $R^2 = 0,963$.

Pro lepší znázornění byl proveden posun základní startovací napěťové úrovně signálu na napětí $U = 0$ V.



Obr. 4.11: Závislost vrcholové hodnoty prvního píku výstupní odezvy TDS pro různou vzdálenost pozice zdroje tepla (p1 – p9) od snímače TDS1. Hodnota startovací úrovně signálu byla položena napětí $U = 0$ V (Sevcikova et al., 2024).

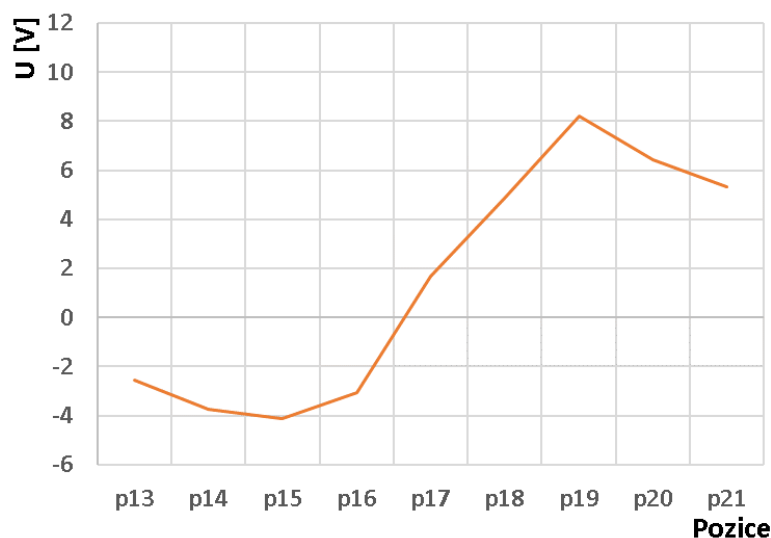
Je proto možné vyslovit hypotézu, že odezva na teplotní impuls je v přímém směru mezi snímači lineární. Předpokládalo se, že uprostřed vzdálenosti mezi snímači (12,5 cm) je odezva systému nulová, posun proložené reálné přímky je 0,75 cm od tohoto bodu.



Obr. 4.12: Upřesněná průměrná výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (p13 – p21) (Sevcikova et al., 2024).

Obdobně, jak byly zpracovány výstupní signály z pozic p1 – p12, byly zpracovány signály z pozic zdroje tepla p13 – p21, Obr. 4.12. I zde je možné vysledovat přechod výšky prvního píku od maxima po minimum přes hodnotu

napětí 0 V při přechodu vzdálenosti od úrovně pozice snímače TDS1 k pozici snímače TDS2. Trasa jednotlivých pozic však není v přímce, ale je lomená v určité vzdálenosti (pozice p17) od snímače TDS1 a neprochází žádným bodem přímé linie mezi senzory. Odezvy termodynamického systému jsou proto nižší. Pokud se pozice zdroje tepla přibližuje k některému ze snímačů, dochází ke zvyšování odezvy termodynamického systému, avšak pokud se zdroj tepla následně od tohoto snímače vzdaluje a dostává se za některý ze snímačů (zde pozice p13, p14, p20 a p21) dochází ke snížení signálu, Obr. 4.13. Sledování velikostí těchto změn a jejich modelování bude součástí dalšího výzkumu.



Obr. 4.13: Závislost vrcholové hodnoty prvního píku výstupní odezvy TDS pro různé pozice zdroje tepla mimo přímou vzdálenost (p13 – p21). Hodnota startovací úrovně signálu byla položena napětí $U = 0 V$ (Sevcikova et al., 2024).

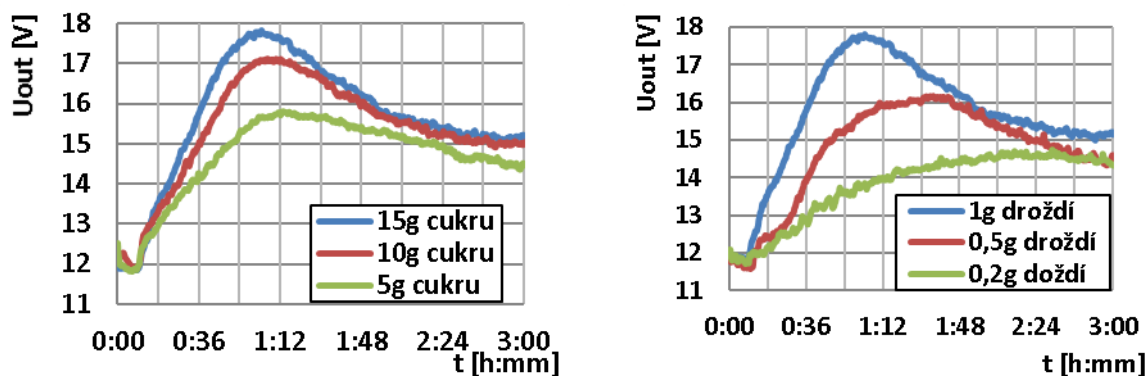
Vývoj jednotlivých měřicích zařízení s termodynamickými systémy na bilančním principu byl zaměřen zejména na oblast procesů v potravinářství. Při výrobě potravin existuje mnoho tepelných procesů – vaření, smažení, pečení, chlazení, mrazení, sterilizace, pasterizace, sušení atd., kde lze sledovat v mnoha těchto procesech pomocí TDS různé parametry, které je nutné velmi často kontrolovat a zaznamenávat pro HACCP a pro certifikaci zákazníky. Předpokládá se např. možnost sledování čistoty oleje používaného při smažení. Protože je termodynamický senzor proti klasickým teplotním snímačům citlivější a rychlejší, je možné měřit i velmi malé teplotní změny. Proto bylo navržena a popsána předpokládaná možnost uplatnění (Adámek et al., 2016):

- při produkci mléčných výrobků – uplatnění ve fermentačních procesech, procesech výroby jogurtu a sýření,
- v pivovarnictví – uplatnění ve fermentačních procesech,
- v lihovarnictví – uplatnění ve fermentačních procesech,
- při kontrole nežádoucího rozvoje kvasinek a jiné mikroflóry,
- v pekařství – fermentační procesy, kontrola životaschopnosti kvasnic,
- nakládané zelí – uplatnění ve fermentačních procesech atp.

Výroba mléčných výrobků (sýry, jogurty, kefirů atd.) může být jednou z nových aplikačních oblastí, kde lze termodynamické senzory využít. Výroba mléka se skládá z komplikovaných a sofistikovaných procesů (Semjan, 1994). Tyto procesy jsou náročné na přesnost, teplotní stabilitu a hygienu. To je důvod pro pečlivou kontrolu jejich kvality. Adámek et al. (Adámek et al., 2016) navrhnul využití termodynamických senzorů v mlékárnách, kde by mohly senzory nepřetržitě sledovat, řídit a regulovat hlavní parametry procesu, např. požadované teploty a odchylky od nich (teplota sterilizace a pasterizace mléka, mléčných výrobků, teplota skladování atd.). Senzory však dokážou sledovat i další výrobní parametry, které lze převést na změnu teplotního toku – čistotu a množství základních surovin (mléko, marmeláda aj.), čistotu a množství pomocných médií (oplachová voda, pomocný plyn atd.), sledování a kontrola nežádoucích událostí – sanitální kontrola výrobních zařízení a prostoru, kontrola opotřebení výrobních strojů atd., (Adámek et al., 2016).

Výroba mléčných výrobků je často realizována fermentačními nebo procesy sýření. Jednoduchá, čistá, bezkontaktní, neanalytická a levná metoda pro průběžné monitorování a stanovení konce procesu v současné době neexistuje. Na základě senzorského hodnocení nebo analytických měření se často určují konečné fáze procesu kvašení nebo sýření. Řešením může být charakterizace a měření těchto procesů pomocí termodynamických senzorů.

Pro experimenty s uplatněním termodynamických senzorů při monitorování potravinářských procesů (se zaměřením na fermentační procesy) bylo nutné zvolit standardní metodu, na které by mohla být zařízení testována a nastavována. Touto metodou byl zvolen jednoduchý fermentační proces s kvasinkami (pekařským droždím) v cukerném roztoku z důvodu jednoduchosti, ceny, snadné dostupnosti a rychlosti procesu. Při tomto stanovení (příklad na Obr. 4.14) byly měněny různé koncentrace cukru a kvasinek a byl monitorován průběh fermentace při pokojové teplotě, případně při teplotě vhodnější pro fermentaci (obvykle 30–35 °C). Naměřené křivky pro fermentační proces kvasinek ve vodě (Adámek et al., 2016) mají podobný charakter jako má obecná růstová křivka kvasinek (Halasz, Lasztity, 2019; Walker, 1998; Neal, 2004).

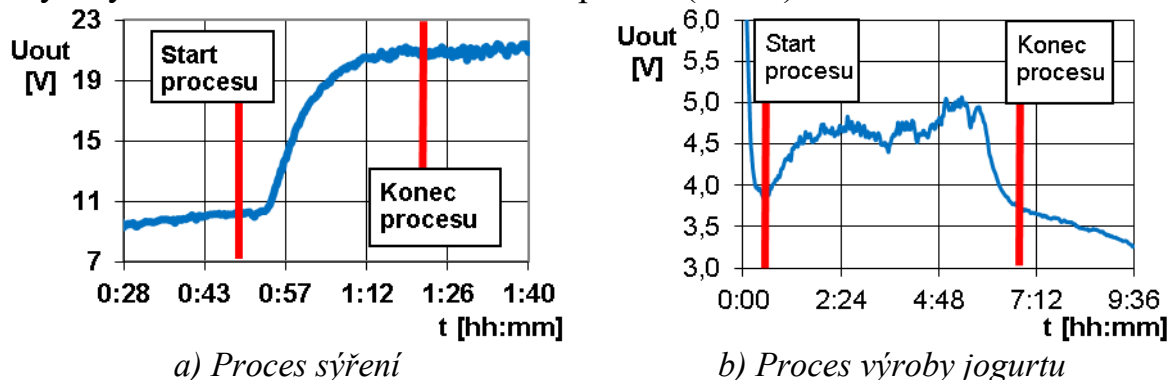


a) Změna množství krystalového cukru

b) Změna množství droždí

Obr. 4.14: Monitorování aktivity kvasinek (droždí) (Adámek et al., 2010).

V předchozích experimentech byla ověřena fermentační aktivita kvasinek pomocí TDS. To bylo podnětem pro další experimenty využívající TDS v potravinářském průmyslu, zejména pro monitorování fermentačních a sýřících procesů. Na Obr. 4.15 jsou uvedeny ukázky výstupní odezvy termodynamického systému pro proces sýření a proces výroby jogurtu. Experimenty byly provedeny se syrovým mlékem v boxu s řízenou teplotou (35 °C).



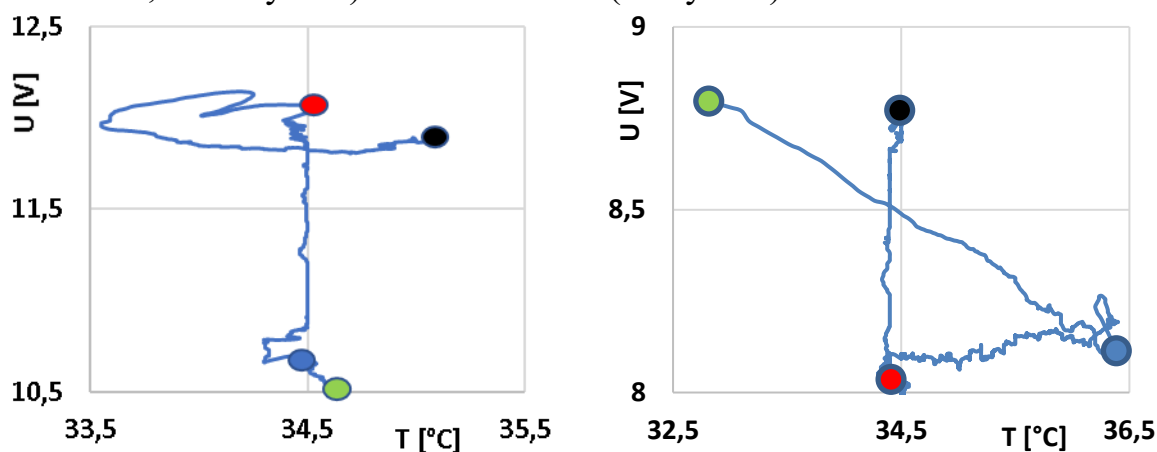
Obr. 4.15: Příklad výstupní odezvy termodynamického systému pro proces sýření a proces výroby jogurtu (Adámek et al., 2016).

Příklad monitorování procesu sýření při výrobě sýru je na Obr. 4.15 a), na kterém je ukázán jak okamžik startu, tak i okamžik ukončení výrobního procesu. Měření je ovlivněno změnou viskozity, která má vliv na termické vlastnosti sýřeniny. Po přidání syřidla (velmi často s enzymem chymosin) do mléka se kazeinové micely začnou agregovat a tvořit gel (Walstra et al., 2005), jehož vlastnosti následně ovlivní teplotní tok mezi snímači TDS.

Obr. 4.15 b) ukazuje charakterizaci procesu výroby jogurtu. Je ukázán začátek a konečná fáze tohoto procesu. Při výrobě jogurtů byla použita směsná základní startovací jogurtová kultura s bakteriálním kmenem *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* a *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* přidány do mléka. Oba živé organismy musí být v produktu v optimálním poměru (Courtin, Rul, 2004; Walstra et al., 2005). Na křivce procesu na obrázku je možné nalézt náznak dvou píků, u kterých se předpokládá přiřazení aktivity laktokoků a streptokoků ve startovací kultuře. Konec měření může být ovlivněn změnou viskozity v konečné fázi procesu.

Dále byla v této oblasti zkoušena fermentace jogurtu bez přídavku, s přídavkem mouky z hmyzu (5 %) a s přídavkem kustovnice čínské (5 %) (Adamek et al., 2022). Při těchto experimentech bylo snahou omezit nežádoucí tepelné vlivy působící na citlivé snímače teploty, které by mohly nežádoucím rušením nebo mírným posunem výstupního napětí ovlivnit výstupní signál. Ve snaze eliminovat tyto nežádoucí vlivy však bylo zjištěno, že směr výstupního signálu čidla se měnil v závislosti na stavu fermentace a teplotě systému, která byla měřena klasickým teplotním snímačem. Příklady dvou identifikovaných závislostí jsou na Obr. 4.16. Na příkladu jsou vyznačeny základní body jako začátek měření (zelený bod), vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přídavkem hmyzí moučky

(modrý bod), 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace, červený bod) a konec měření (černý bod).

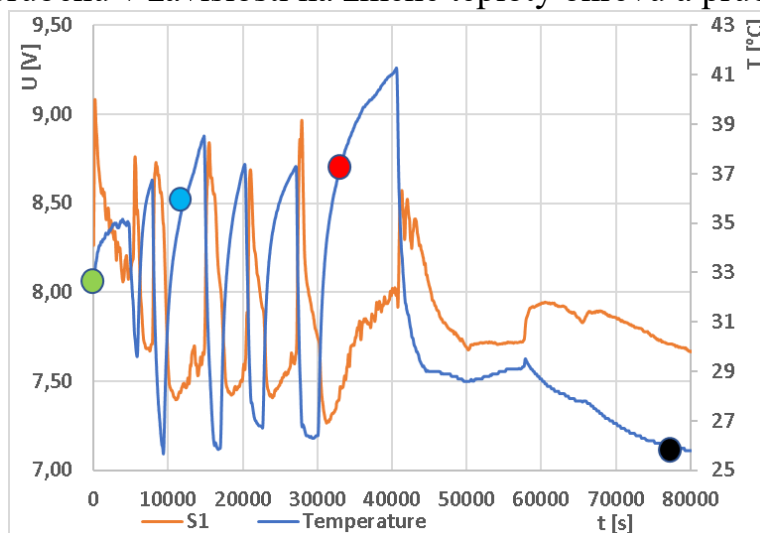


(a) Jogurt bez přidané přísady.

b) Jogurt s přidavkem hmyzí moučky.

Obr. 4.16: Průběhy závislosti výstupního napětí a teploty při sledování procesu výroby jogurtu pomocí termodynamického systému. Popis bodů: Zelená - Začátek měření, modrá - vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přidavkem, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá - konec měření (Adamek et al., 2022).

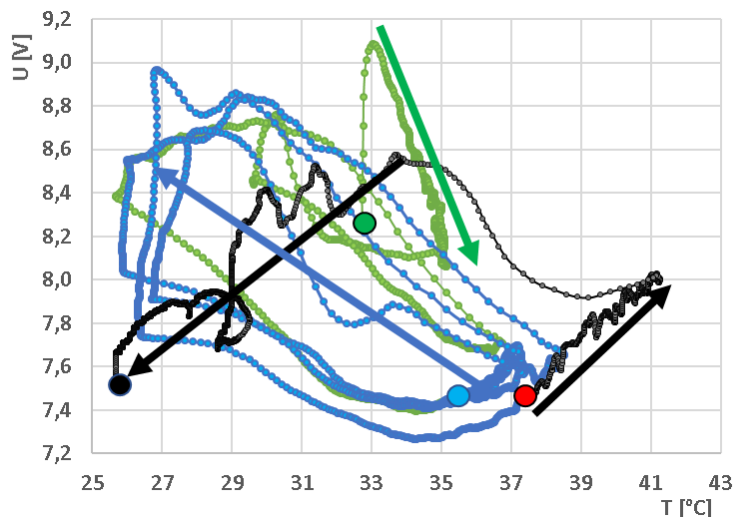
Vzhledem k zajímavosti výše uvedených křivek byl sledován fermentační proces při výrobě jogurtu, při kterém se měnila teplota zapínáním a vypínáním topného tělesa v experimentálním zařízení. Výsledný experimentální průběh je na Obr. 4.17. Z výchozích dat byly získány charakteristiky výstupní odezvy snímače při sledování průběhu v závislosti na změně teploty ohřevu a průběhu v čase.



Obr. 4.17: Monitorování průběhu fermentace jogurtu bez přidavku aditiva pro termodynamický systém při rozmítání teploty ohřevu. Popis bodů: Zelená - Začátek měření, modrá - vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přidavkem, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá - konec měření (Adamek et al., 2022).

Závislost výstupního napětí na teplotě je na Obr. 4.18. Průběh charakteristiky ukazuje, že po prvotním náběhu systému (cca 60 s, ze začátku měření signál vzhůru) dochází k ustálení teploty po delší dobu (cca 4800 s, označeno zelenou

šipkou) až do prvního vypnutí regulátoru teploty. Zde se podle grafu předpokládá klesající závislost na napětí vzhledem k rostoucí hodnotě teploty negativní směrnicí. S prvním zásahem regulátoru následně došlo v charakteristice k pohybu po smyčce s negativním směrem (označeno světle modrou barvou). V čase 11760 s byla přidána jogurtová kultura (modrý bod). Přestože ve vypínání a zapínání regulace teploty bylo pokračováno, cca po 6 hodinách výroby jogurtů (červený bod) došlo ke změně pohybu. Po fermentaci se tak vlastnosti změnily a směrnicí se změnila na pozitivní (černá šipka), (Adamek et al., 2022).

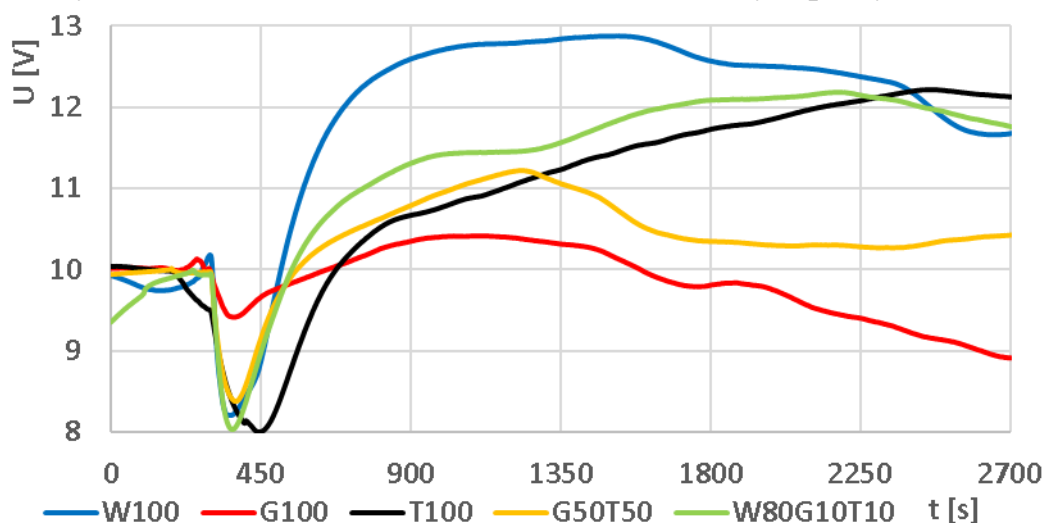


Obr. 4.18: Závislost výstupního napětí na teplotě v průběhu jednotlivých fází fermentace při výrobě jogurtů pro termodynamický systém. Popis bodů: Zelená – Začátek měření, modrá – vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přísadami, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá – konec měření (Adamek et al., 2022).

Přestože tento experiment ještě nebyl následně opakován, je sledování směrnic zajímavou možností, jak lze využít nepřesnosti a hystereze termostatů při regulaci teploty u výroby jogurtů (např. při domácí výrobě) k definování konce fermentačního procesu a jeho automatickému ukončení, (Adamek et al., 2022).

Dále byla zaměřena pozornost autora na monitorování procesu fermentace těst, zejména se zaměřením na těsta s přísadami netradiční komodity, Obr. 4.19. Srovnávacím vzorkem bylo těsto ze 100% pšeničné mouky, u kterého výsledky ukázaly rychlý vzestup sledovaného napětí na vyšší hodnotu s následnou stabilizací a mírným poklesem (modrá křivka, označení W100). Naopak 100% moučka ze sušených výlisků z hroznů odrážela velmi malou změnu tepelného toku (a tím i tepla emitovaného nebo spotřebovaného) (červená křivka, označení G100). 100% moučka ze sušených larev potměníka moučného (černá křivka, označení T100) sice vyvolala výraznější pokles křivky na začátku měření a pomalejší start, ale nakonec dosáhla stejné hodnoty jako směs s 80 % pšeničné mouky, 10 % hroznové moučky a 10 % moučky ze sušených larev potměníka moučného (zelená křivka, označení W80G10T10). Tato směs měla sice strmější pokles sledované křivky na počátku než 100% pšeničná mouka, ale v ostatních částech byla mírnější a blížila se svým charakterem více křivce 100% moučky

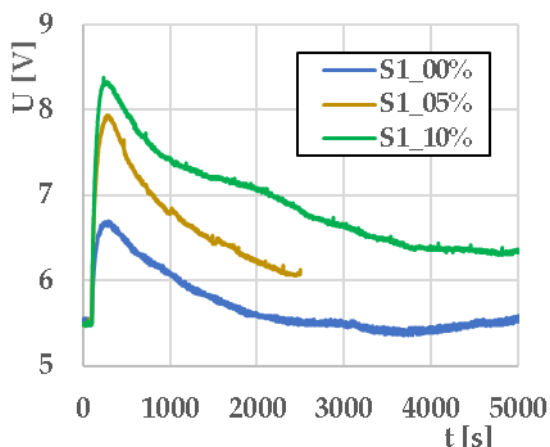
z larev potměníka moučného, a to i přesto, že této moučky obsahovala jen 10 %. U poslední z měřených směsí (50 % moučky z výlisků z hroznů a 50 % z larev moučných červů, označení G50T50, žlutá křivka) byl charakter růstu podobný jako u vzorku 100% moučky z moučných červů, ale v určité fázi došlo k poklesu a stabilizaci (Adamek et al., 2020). Obecně platí, že jiná dostupná literatura zkoumá kynutí těst pomocí reofermentografu, stanovující měření nárůstu objemu těsta a objemu plynu CO₂ uvolňovaného z těsta. Např. Hirasawa a Yokoigawa (Hirasawa, Yokoigawa, 2001) stanovovali schopnost kynutí kvasnicových buněk měřením při 30 °C po dobu 5 hodin pomocí Fermografu AF-1000 (Atto Co., Japonsko). Tyto metody jsou však založeny na změnách mechanických a chemických vlastností těsta, zatím co TDS měří změny tepelných vlastností.



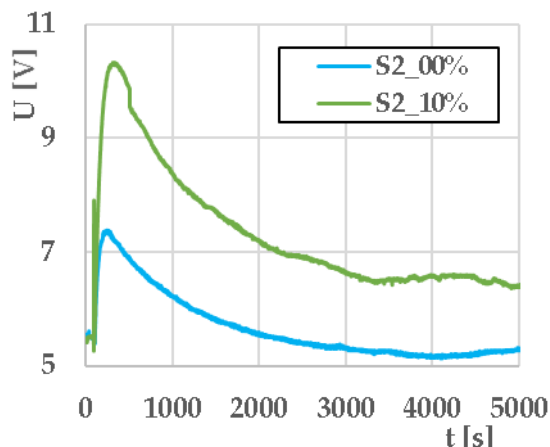
Obr. 4.19: Monitorování fermentačního procesu u těst s přidavkem netradiční komodity (Adamek et al., 2020).

Následovalo sledování kynutí těsta na pizzu bez přidavku (0 %) a s přidavkem moučky z larev potměníka moučného (5 % a 10 %). Podrobnější informace o receptuře a podmínkách měření jsou uvedeny v (Adamek et al., 2022). Zjištěné výsledky jsou znázorněny na Obr. 4.20. Křivka fermentace měla podobný průběh u všech tří vzorků. V první fázi došlo ke krátkému prudkému růstu a v další části křivka postupně klesala. Nejrychlejší a nejstrmější začátek fermentace byl zjištěn u směsi s přidavkem 10 % hmyzí moučky. Hodnoty vzorku s přidavkem 5 % hmyzí moučky byly mezi vzorky bez přidavku a s přidavkem 10 % hmyzí moučky. Lze tedy usoudit, že přidání moučky z larev potměníka moučného do těsta zlepšilo a urychlilo proces fermentace těsta. Zjištění bylo možné vysvětlit cestou dosud nespécifikovaných bioaktivních látek obsažených v jedlém hmyzu, které podporovaly životaschopnost kvasinek v těstě.

Měření probíhalo se stejným materiálem ve dvou termodynamických systémech najednou. Přestože bylo snahou vyrobit systémy stejné, drobné konstrukční rozdíly v systémech a možné drobné materiálové chyby vedly k rozdílným velikostem výstupního napětí. To upozorňuje na jednu z nevýhod těchto termodynamických systémů, kdy každý termodynamický systém je jedinečný a je nutné jej nastavovat individuálně.

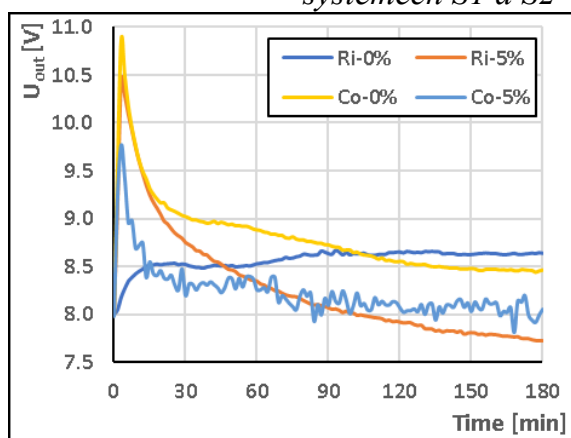


a) Systém S1

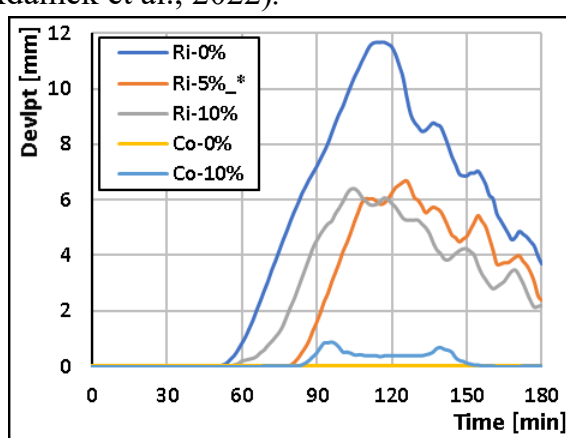


b) Systém S2

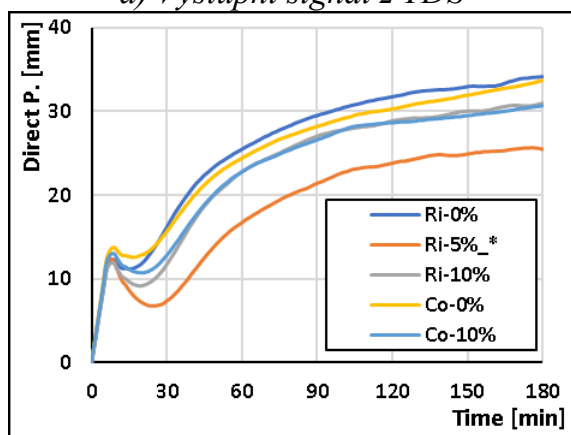
Obr. 4.20: Monitorování kynutí těsta na pizzu bez přídavku (0 %) a s přídavkem moučky z larev potměníka moučného (5 % a 10 %) ve dvou termodynamických systémech S1 a S2 (Adamek et al., 2022).



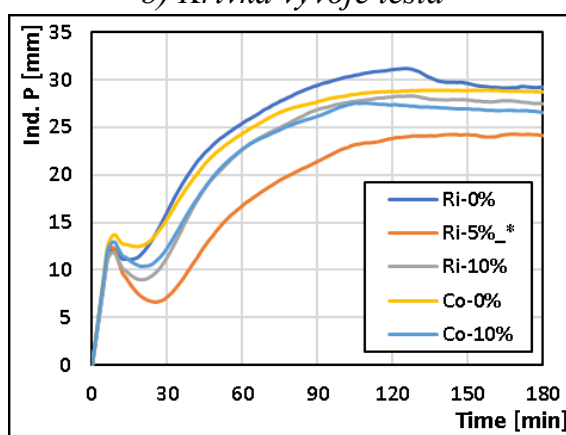
a) Výstupní signál z TDS



b) Křivka vývoje těsta



c) Křivka uvolňování plynu
– celkový objem



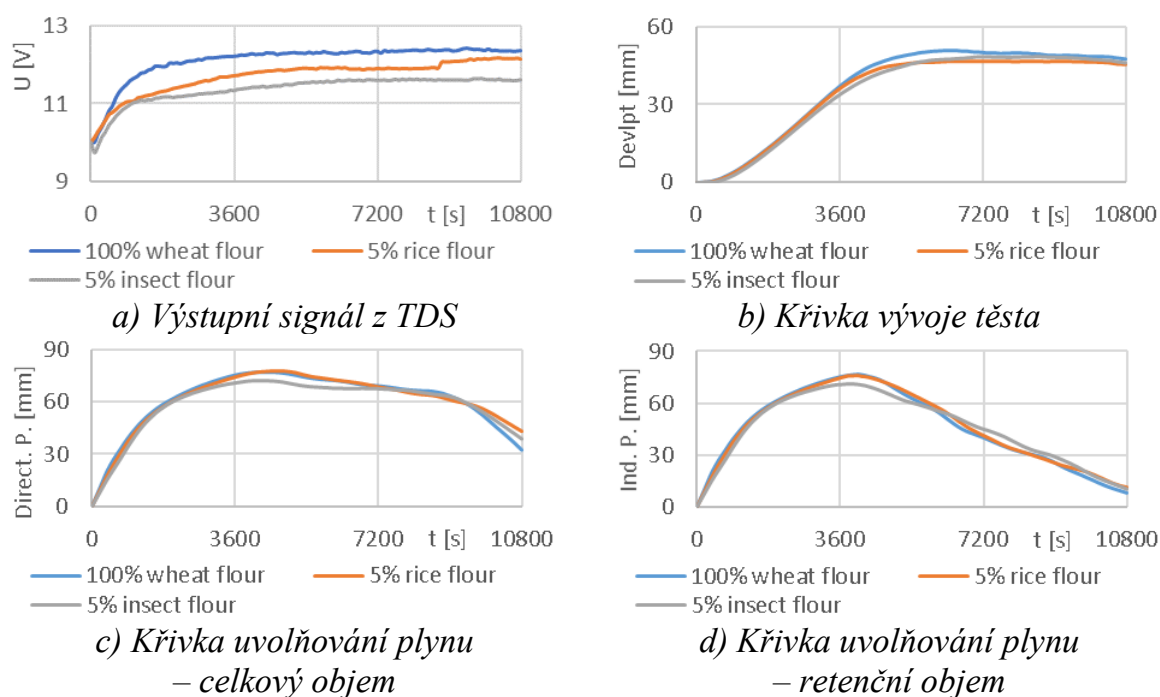
d) Křivka uvolňování plynu
– retenční objem

Obr. 4.21: Porovnání výstupního signálu U_{out} z experimentálního termodynamického systému s výstupními signály z profesionálního reofermentometru Rheo F-4 (Chopin, Francie) u bezlepkových těst (Adamek et al., 2023).

Další směřování experimentů v oblasti těst vedlo k bezlepkovým moukám a těstům, kde je nutné řešit problémy s malým zvyšováním objemu těst při kynutí

a následně s „nadýchaností“ pekařských výrobků. I zde byl základní typ mouky (rýžová „Ri“ nebo kukuřičná „Co“) fortifikován moučkou ze sušených larev potměníka moučného (5 % nebo 10 %). Výsledné hodnoty byly porovnány křivkami z reofermentometru Rheo F4 (Chopin, Francie) (Adamek et al., 2023). První výsledky jsou ukázány na Obr. 4.21. Důležitými výsledky bylo, že rozdíl mezi typy těst bylo možné zaznamenat termodynamickým systémem (výrazný je zejména rozdíl u rýžové mouky pro vzorek bez přídavku mouky z hmyzu a s ním, Obr. 4.21 a)) a fakt, že přídavek hmyzu zlepšil křivku vývoje těsta z kukuřičné mouky (Obr. 4.21 b). Pomocí obohacení o malé množství této netradiční komodity se zlepšila intenzita fermentace těsta a zároveň se produkt obohatil o další nutriční složky (Adamek et al., 2023). Korelace výstupních signálů mezi systémy TDS a Rheo F-4 byla stanovena pomocí Pearsonova korelačního koeficientu (Adamek et al., 2023). Výsledky ukázaly nízkou korelaci mezi výstupními křivkami z TDS a křivkou vývoje těsta z RF-4, avšak ve srovnání s křivkou uvolňování plynu stoupá Pearsonův korelační koeficient nad 0,85.

Měření na reofermentometru Rheo F4 a v termodynamickém systému probíhaly u výše uvedených měření bezlepkových těst na odlišných pracovištích. Pro vyloučení chyb, které by z toho mohly plynout, bylo následující měření těst provedeno na stejném pracovišti ve stejný okamžik se stejným materiálem. Jako základ těsta byla zvolena 100% hladká pšeničná mouka, která byla modifikována 5 % rýžové mouky nebo 5 % moučky ze sušených larev potměníka moučného (Sevcikova et al., 2024). Výsledky ukazuje Obr. 4.22 a Tabulka 4.1.



Obr. 4.22: Porovnání výstupního signálu U_{out} z experimentálního termodynamického systému s výstupními signály z profesionálního reofermentometru Rheo F-4 (Chopin, Francie) u pšeničných těst (Sevcikova et al., 2024).

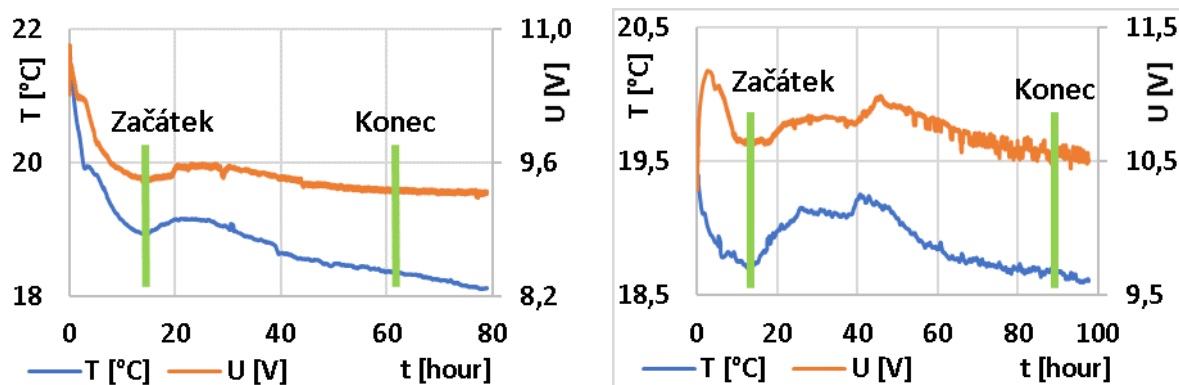
Tabulka 4.1: Korelace křivek naměřených profesionálním reofermentometrem Rheo F-4 s křivkou z experimentálního TDS u pšeničných těst. Červeně vyznačené koeficienty jsou statisticky významné (Sevcikova et al., 2024).

Typ mouky	Pearsonův korelační koeficient		
	Devlpt	Direct. P.	Ind. P.
100% pšeničná mouka	0,821	0,778	0,242
95% pšeničná mouka + 5% rýžová mouka	0,932	0,707	0,060
95% pšeničná mouka + 5% mouka z hmyzu	0,886	0,786	0,198

Tabulka 4.1 dokumentuje nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu pro křivky vývoje objemu těsta (Devlpt), kde dosahuje hodnoty až 0,932. Naopak nejnižší zjištěná hodnota korelačního koeficientu je u objemu plynu zadrženého v těstě (Ind. P.), kde u směsi 95 % pšeničné mouky + 5 % rýžové mouky hodnota klesá až na 0,060 a korelace je hodnocena jako statisticky nevýznamná. Sloupec Direct P. ukazuje korelaci výstupní odezvy TDS s celkovým objemem vyprodukovaného plynu. Tyto hodnoty se pohybují od 0,707 do 0,785 a jsou všechny hodnoceny jako statisticky významné, stejně jako u křivek vývoje objemu těsta (Devlpt).

Další výzkum by mohl dosáhnout dostatečné úrovně korelace mezi signály z reofermentometru a TDS, která by umožnila využít TDS (zejména v kombinaci s e-nosem) jako alternativní nebo doplňkovou metodu k reofermentometru.

Jiná část experimentů se soustředila na monitorování kvašení piva (Adamek et al., 2022). Na Obr. 4.23 jsou uvedeny výsledné charakteristiky ze dvou experimentů, které se lišily přípravou kvasinek. V prvním experimentu byly kvasinky temperované na teplotu okolí, v druhém experimentu byly přidány přímo z lednice. V obou experimentech začíná graf poklesem křivek, který ukazuje ochlazování mladiny a teplotní stabilizaci. Okamžik na konci poklesu a začátku vzestupu výstupního napětí termodynamického senzoru dokumentoval změny vnitřní tepelné aktivity a znamenal začátek fermentačního procesu a nárůst teploty ve směsi. Když hodnota napětí z termodynamického senzoru poklesla, stabilizovala se a nedocházelo k dalším změnám tepelného toku, byl vyhodnocen konec fermentace. Teplota měřeného roztoku se již výrazně neměnila a vyrovnávala se okolní teplotě. Teplota fermentační nádoby (v grafu modře) byla měřena konvenčním termočlánkem. Proces kvašení však neskončil přesně v tuto dobu, protože kvasná směs s kvasnou nádobou měla určitou tepelnou kapacitu, která způsobila akumulaci určitého množství tepla v systému. Jeho důsledkem bylo snížení změny tepelného toku v počáteční fázi kvašení (část tepla byla použita na ohřev měřicího systému) a tepelný dozvuk systému na konci fermentace, kdy aktivita kvasinek ustala. Upřesnění tohoto okamžiku by však vyžadovalo jinou metodu měření (obvykle časově, materiálně nebo finančně náročnější) (Grassi et al., 2014; Anton Paar GmbH, 2022).



a) kvasnice temperované na teplotu okolí.

b) kvasnice přímo z lednice

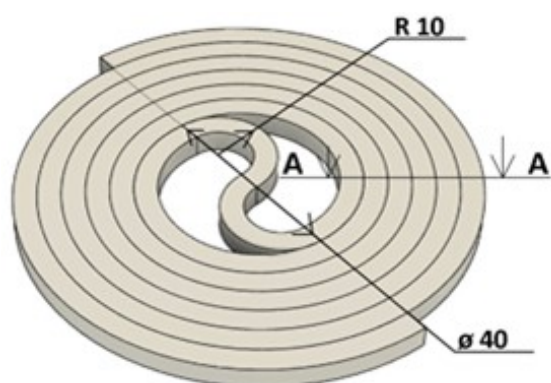
Obr. 4.23: Monitorování procesu svrchního kvašení mladiny. Popis křivek - oranžová - Výstupní napětí TDS U [V]; modrá - teplota plastové fermentační nádoby měřená klasickým teplotním snímačem (Adamek et al., 2022).

Vzhledem k tomu, že se jedná o novou oblast aplikace TDS a novou metodu měření, není možné zatím naměřené výsledky přímo porovnávat s jinou literaturou z hlediska sběru a vyhodnocování konkrétních hodnot analytu. Výsledky lze pouze odhadovat ve srovnání se standardními metodami. Klasické běžně popisované metody pro sledování fermentačních procesů při výrobě piva jsou metody kontaktní, méně flexibilní a časově, ekonomicky, materiálně i odborně náročné (Kurz et al., 2001). Přestože jsou tyto metody přesné, jejich uplatnění v malých pivovarech nebo v domácích podmínkách je pro své nevýhody minimální. I když existují moderní a rychlé metody, které se snaží některé nevýhody klasických metod eliminovat (Chandra et al., 2017; Rodríguez Méndez, Preedy, 2016; Tarkiainen et al., 2005), většinou je nelze aplikovat v malých pivovarech nebo v domácích podmínkách z důvodu již zmíněné ceny, ekonomické nebo odborné náročnosti, nebo z důvodu nedostatečné robustnosti měřicí metody. Navíc je jejich princip odlišný od TDS, proto nemohou být s touto metodou z hlediska vyhodnocování konkrétních hodnot analytu srovnány. Protože senzory TDS lze aplikovat bez přímého kontaktu s měřenou potravinou, lze odhadovat pouze rozdíly v implementaci a rozdíly v obslužné a finanční náročnosti. Hlavním přínosem je však v případech uvedených výše popsány experimentální postup spočívající v monitorování kvašení mladiny v reálném čase, kdy systém sbíral data a ukládal je každých 120 s po dobu téměř 100 hodin.

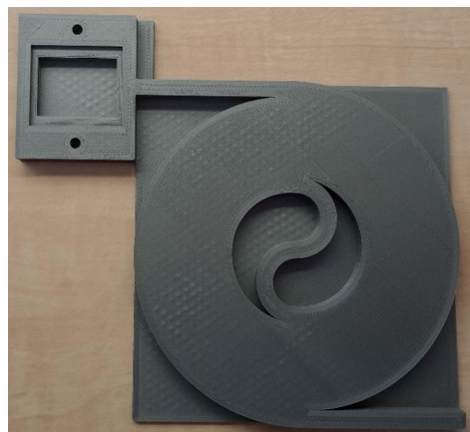
4.2 Elektronický nos a jeho využití v potravinářských procesech

Obdobně jako u TDS, byl i výzkum v oblasti elektronického nosu rozdělen na oblast základního výzkumu a aplikační část. V oblasti základního výzkumu bylo snahou navrhnout a otestovat metody pro zvýšení přesnosti detekce levných chemorezistivních snímačů používaných v přenosných zařízeních typu elektronický nos. Nevýhoda reakce snímače na několik sloučenin najednou byla řešena separací vzorku plynu jeho pomalým prouděním hnaného čistým

vzduchem přes 3D vytištěnou kapiláru (Adamek et al., 2023). V práci byla navržena kapilára 3D kapilára vyrobená technikou FDM (Fused Deposition Modeling) z kyseliny polymlečné PLA (lactic acid polymer) se základním uspořádáním inspirovaným články (Sandron et al., 2014) a (Lucklum et al., 2015). Základní model 3D tištěné kapiláry a realizovaná jednopatrová 3D tištěná kapilára s měřicí komůrkou jsou ukázány na Obr. 4.24. Mimo kapiláry s jedním patrem závitů byly realizovány ještě kapiláry se dvěma a třemi patry. Délka kapiláry se třemi patry byla spočítána na $d = 4,7$ m a je porovnatelná s komerčními kapilárami, které jsou dnes běžně dostupné v délkách od 10 do 60 m (Grob, Barry, 2004; SHIMADZU Handels GmbH, 2023).



a) Základní model 3D tištěné jednopatrové kapiláry

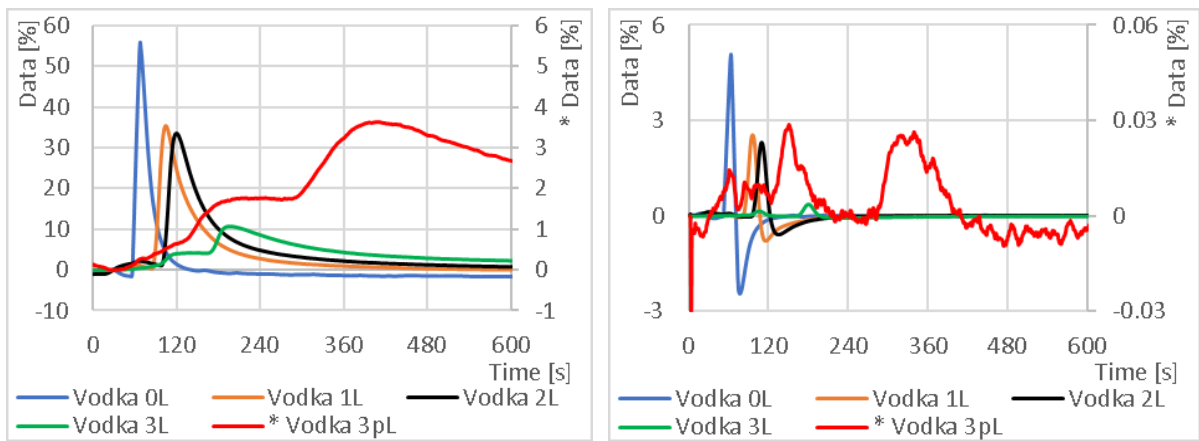


b) Realizovaná jednopatrová 3D tištěná kapilára s měřicí komůrkou

Obr. 4.24: 3D tištěná jednopatrová kapilára (Adamek et al., 2023).

Po projití vzorku kapilárou následovalo měření v měřicí komůrce pomocí snímače MiCS 6814 (SGX Sensortech), který je složen ze tří senzitivních elementů - RED senzor (zejména CO), OX senzor (zejména NO₂) a NH₃ senzor. Mimo základní plyny reagují jednotlivé senzory i na další skupiny plynů. Výstupní signály z jednotlivých elementů byly vyhodnocovány pomocí experimentální konstrukce elektronického nosu založeného na mikropočítači ATmega 2560 (Microchip Technology Inc.) naprogramované na platformě Arduino MEGA 2560. Mimo ovládání displeje a komunikace zajišťoval dále mikropočítač řízení nástřiku vzorku a ovládání průtoku nosného plynu.

První testování bylo provedeno s cílem charakterizovat jednotlivé konfigurace kapilár na vzorku "Vodka" (GAS Familia, s.r.o.), u které výrobce uváděl složení 37,5 % obj. ethanolu a 62,5 % obj. vody. Výsledky (Obr. 4.25) ukazují rozdělení časové závislosti výstupního signálu na několik samostatných oblastí detekující různé skupiny plynů, které je vidět zejména na grafu absolutního přírůstku. Toto rozdělení je vidět zejména v případě použití třípatrové kapiláry, poloviční rychlosti průtoku plynu a RED senzoru (Obr. 4.25), který sice reaguje zejména na CO, ale významně také na etanol, vodík, čpavek, propan, metan, isobutan nebo H₂S (Adamek et al., 2023). U vzorku "Vodka" se předpokládá rozdělení na oblast ethanolu a vodní páry. Tím se podařilo docílit určitého předzpracování vzorku.

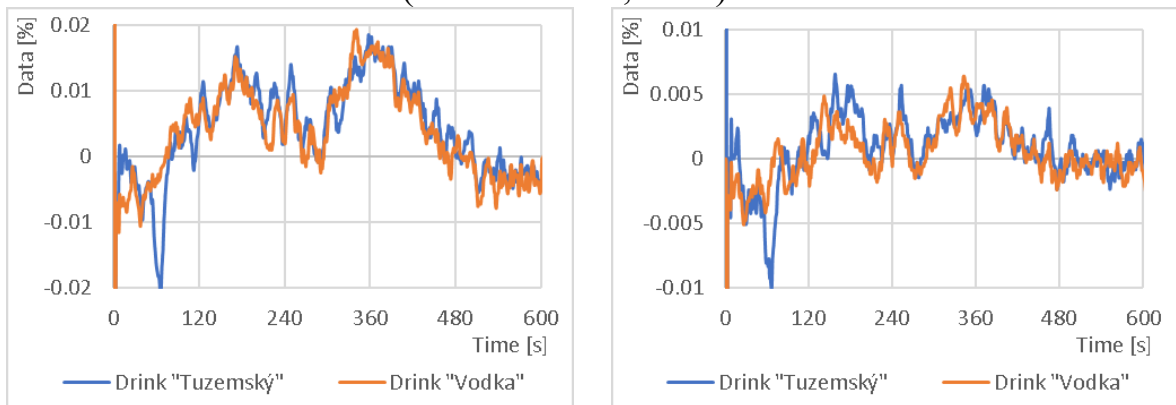


a) výstupní odezva z RED senzoru

b) absolutní přírůstek z RED senzoru

Obr. 4.25: RED snímač – Výstupní odezva a absolutní přírůstek. Číslo označuje počet vrstev (L - layers) kapiláry. „0L“ značí přímý nástřik do měřicí komůrky. „p“ značí poloviční rychlost nosného plynu (Adamek et al., 2023).

V kapiláře docházelo k separaci vzorku na obdobném principu jako je tomu u plynového chromatografu, avšak cenová relace tohoto řešení byla o několik řádů nižší. Přestože tímto způsobem nelze plynový chromatograf nahradit, je alespoň možné zvýšit přesnost identifikace jednotlivých směsí v plynu u levných chemorezistivních senzorů (Adamek et al., 2023).



a) NH_3 senzor

b) OX senzor

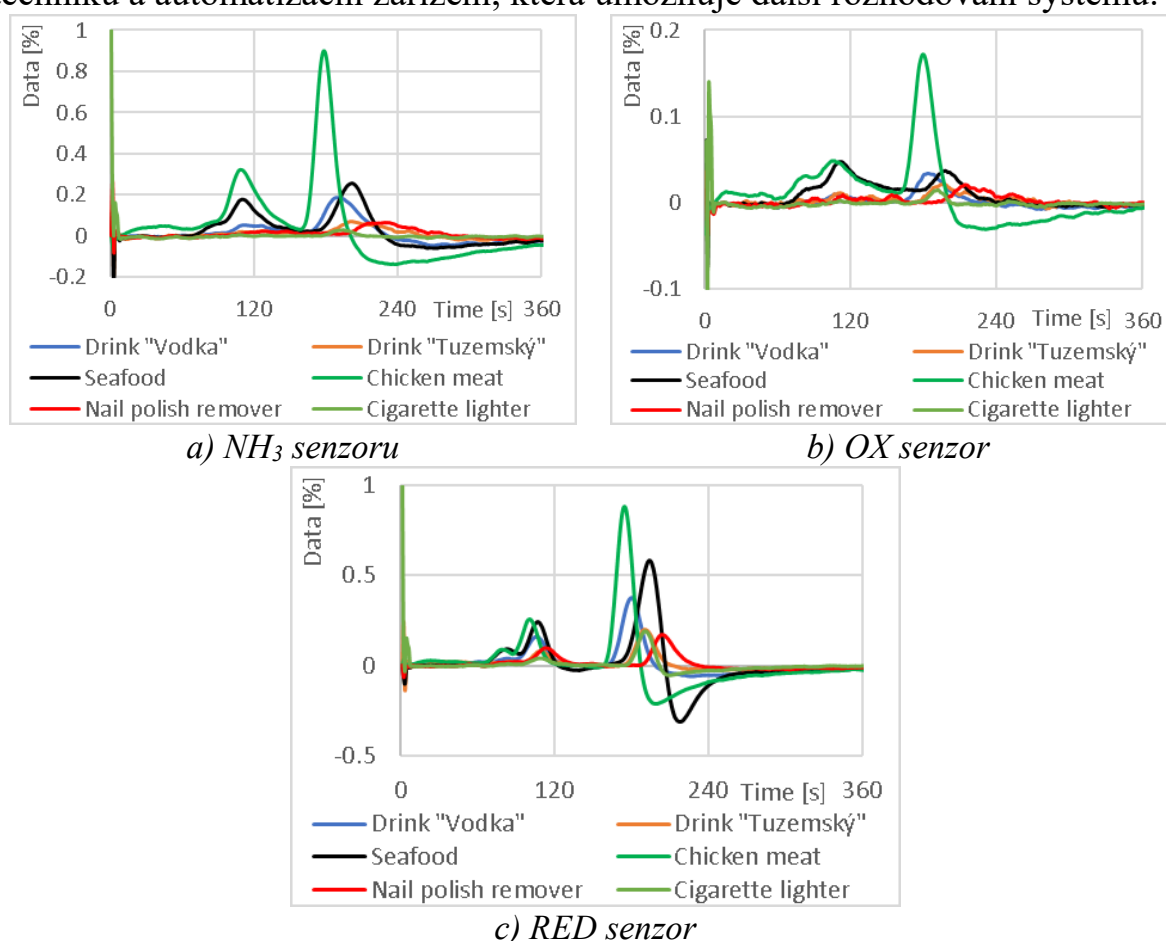


c) RED senzor

Obr. 4.26: Absolutní přírůstek výstupní odezvy senzorů při použití třípatrové kapiláry a poloviční rychlosti průtoku plynu pro vzorky „Vodka“ a „Tuzemský“ (Adamek et al., 2023).

Separace vzorku na jednotlivé části byla následně potvrzena při porovnávání vzorku „Vodka“ a „Tuzemský“, kdy při nastavené poloviční rychlosti pohybu nosného plynu, byly v grafu zaznamenány dvě oddělené oblasti (píky) u senzoru RED a NH₃, Obr. 4.26. U OX senzoru je naznačen uprostřed i vrchol třetí.

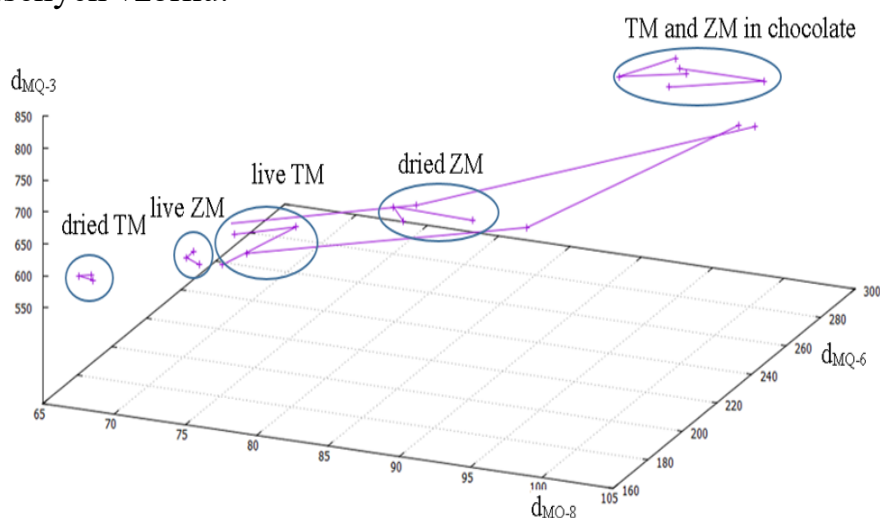
Dále byl systém testován na různých vzorcích (Vodka, Tuzemský, mořské plody, mořské plody (uchovány 1 den při pokojové teplotě), kuřecí maso (uchováno 3 dny při pokojové teplotě), plyn ze zapalovače cigaret a výpary z odlakovače nehtů). Na grafech absolutních přírůstků signálu u jednotlivých senzorů, Obr. 4.27, jsou vidět rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Charakterizací jednotlivých vrcholů v čase je možné získat další informace o měřeném vzorku a tím lépe vzorek identifikovat v rámci jednoho měřicího elementu. Při použití více měřicích elementů s touto identifikací může dojít k dalšímu zpřesnění identifikace jednotlivých vzorků. Systém může být navázán na výpočetní techniku a automatizační zařízení, která umožňuje další rozhodování systému.



Obr. 4.27: Absolutní přírůstek výstupní odezvy senzorů při použití třípatrové kapiláry pro různé dostupné vzorky (Adamek et al., 2023).

Rozpoznávání vzorků v rámci identifikace jednotlivých potravinářských komodit bylo další částí výzkumu (Adáamek et al., 2017; Adáamek et al., 2018; Adáamek et al., 2019). Zde bylo sestrojeno několik variant elektronických nosů a porovnávány různé potravinářské komodity. Již u jedné z prvních variant sestrojených experimentálních elektronických nosů bylo prokázáno, že pro

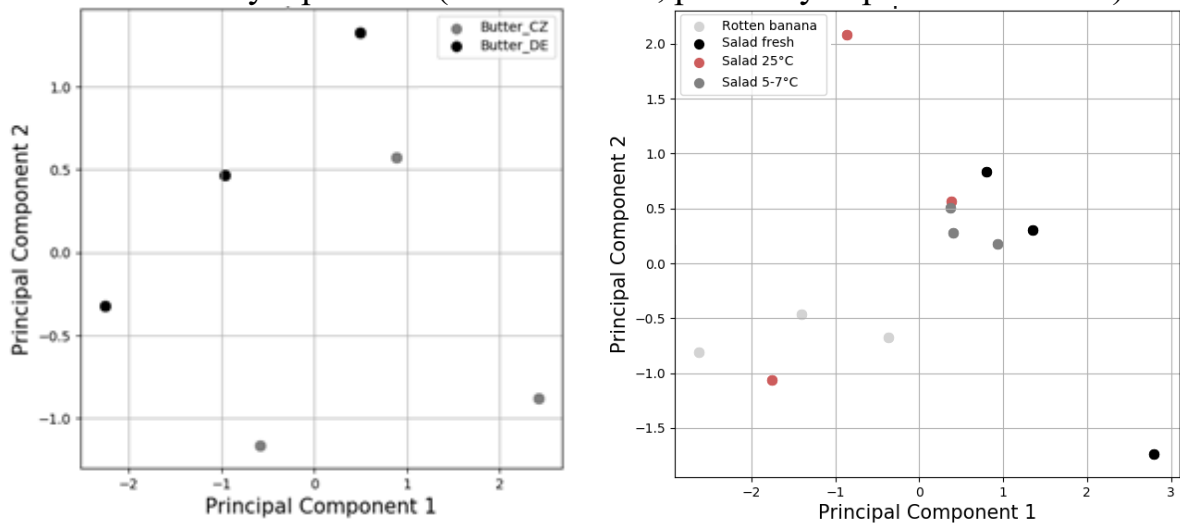
identifikaci stavů potravinářské komodity může být použita kombinace pouze třech různých chemorezistivních senzorů (Adámek et al., 2017) – MQ-3, MQ-6 a MQ-8 (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd). Při identifikaci vzorků jedlého hmyzu (živé po vyhladovění, sušené a v čokoládě zalité vzorky larev potměníka moučného (*Tenebrio molitor*, TM) a potměníka brazilského (*Zophobas morio*, ZM) podle Obr. 4.28 byly tyto vzorky identifikovány v jednotlivých skupinách a podle signálu je bylo možné navzájem odlišit. Hodnoty vzorků těsně po usmrcení larev vroucí vodou jsou rozptýleny v grafu. To může být způsobeno zvýšenou teplotou a vlhkostí, na které jsou senzory citlivé a které u tohoto měření nebyly stanoveny a korigovány. Hodnoty vzorků v čokoládě jsou u každého druhu velmi podobné. Rozdíl mezi druhy je zřetelný u živých a sušených vzorků.



Obr. 4.28: Použití třech různých chemorezistivních senzorů při identifikaci úpravy jedlého hmyzu (Adámek et al., 2017).

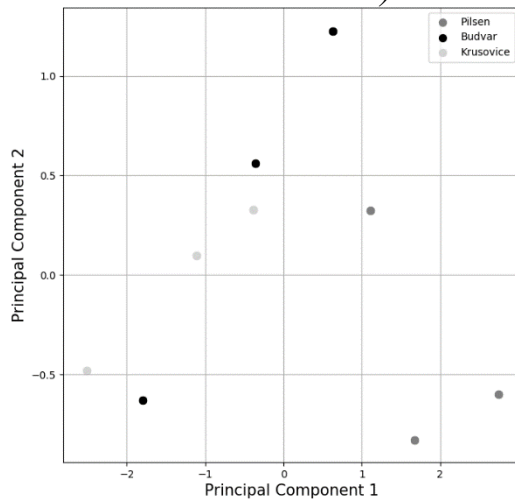
Většina profesionálních elektronických nosů však nepoužívá pouze tři senzory, jak bylo uvedeno výše u identifikace úprav jedlého hmyzu, ale pro identifikaci vzorků a upřesnění měření jsou vyhodnocovány signály ze sensorových polí s více než 10 citlivostními elementy. S postupující miniaturizací citlivostních elementů je jich často i několikrát více. K vyhodnocování těchto signálů jsou pak zvoleny sofistikované nástroje matematické analýzy. Mezi nimi je často používána Analýza hlavních komponent (Principal Component Analysis, PCA) z důvodu snížení dimenze dat s co nejmenší ztrátou informace (Sebera, 2012). Této metody bylo v této práci využito např. při identifikaci vzorků másla, čerstvosti zeleninového salátu a vzorku českých piv, Obr. 4.29, uvedené ve studii (Adamek et al., 2021). Mezi závěry této studie patří zejména idea zpřesnění a zjednodušení analýzy pachů jak z hlediska použitého softwaru, tak i hardwaru. V případě sofistikovaného hardwarového vybavení je sice dosahováno kvalitních výsledků analýz, avšak při výrazně vyšších cenových nákladech a omezené nebo zcela žádné mobility. Idea jednoduchých a hardwarově levných zařízení, ale s propracovaným softwarovým vybavením. V současné době nabývají na významu v této oblasti i prvky a metody umělé inteligence. Idea jednoduchých analyzátorů

pachů by pak mohla být využita nejen odbornou, ale zejména laickou veřejností. Vzhledem k postupující miniaturizaci a optimalizaci by pak mohla být celé zařízení použito jako gadget pro chytré telefony, jehož výhodou by mohlo být propojení na další mobilní systémy a inteligentní zařízení. Další výhodou je výrazně nižší cena, než mají současné laboratorní analyzátoři (Adamek et al., 2021). Navíc by mohlo docházet k časovým a materiálovým úsporám (některá cenově náročná měření laboratorními analyzátoři by mohly být nahrazeny měřeními na levnějších mobilních zařízeních) a zvyšování udržitelnosti jako jednoho z klíčových vládních bodů. Okamžitou a spolehlivou analýzou potravin samotnou veřejností, která by tak byla umožněna, by se zvýšila i ochrana před zdravotními riziky z potravin (zkažené maso, potraviny napadené škůdci...).



a) Vzorky másla

b) Stanovení čerstvosti salátu



c) Vzorky českých piv

Obr. 4.29: Využití PCA analýzy při vyhodnocení signálů z experimentálního e-nosu u vzorků másla, českých piv a stanovení čerstvosti salátu (Adamek et al., 2021).

V oblasti naprogramování PCA analýzy a její využití jako nástavbové funkce při zpracovávání signálů z elektronického nosu bylo zpracováno několik prací na fakultní úrovni. V rámci řízení elektronického nosu a vyhodnocování dat z něj

byla v práci (Almazov, 2019) implementována PCA analýza do řídicího programu v jazyce Python, určeného pro ovládání elektronického nosu. Další práci na toto téma řešila Janošíková (Janošíková, 2022), která nejen ovládala experimentální e-nos a PCA analýzu na mobilním telefonu, ale testovala i kompetitivní sensorovou fúzi pro další zpřesnění snímaných dat.

4.3 Využití e-nosu a TDS v potravinářské praxi

V oblasti potravinářství a jeho automatizace může mít elektronický nos různá uplatnění a aplikace. Jednou z nevýhod lidského nosu je, že si po určité době navykne na pachy v prostředí. Proto mohou posuzovatelé pachu zhodnotit pouze určité množství vzorků. Elektronický nos tuto nevýhodu nemá, proto může být integrován do automatizovaných produkčních linek k nepřetržitému monitorování a kontrole výroby. To může pomoci minimalizovat produkci vadných nebo nekvalitních výrobků, zvýšit celkovou efektivitu a produktivitu výroby, snížit energetickou náročnost a zvýšit udržitelnost výroby. E-nos proto může být použit samostatně nebo v kombinaci s ostatními sensorickými systémy pro automatizaci různých procesů. Těmito procesy může být např. kontrola bezpečnosti, kontrola kvality, kontrola trvanlivosti potravinářského výrobku, kontrola falšování produktů, nebo vývoj produktů.

Je důležité poznamenat, že přesná aplikace elektronického nosu do potravinářského řetězce může záviset na konkrétních potřebách, požadavcích a účelu daného potravinářského procesu, dodavatele, spotřebitele nebo jiného subjektu zasahujícího do potravinářského řetězce. Tím může být jak integrace do automatizovaných výrobních linek, tak i využití pro monitoring globálního zásobování potravinami a možnost zásahu do těchto toků, např. vzhledem k dokonalejšímu odhalování falšovaných potravin.

Obdobně jako elektronický nos může být použit pro monitorování potravinářských procesů, mohou být i termodynamické senzory využity v potravinářském průmyslu pro monitorování procesů, zejména fermentačních. Tyto senzory mohou poskytnout důležité informace o teplotních charakteristikách během fermentace, což může pomoci optimalizovat proces a zlepšit kvalitu výsledného produktu. Optimalizací potravinářských procesů může být dosaženo vyšší šetření potřebných vstupních energií (např. elektrického vyhřívání při procesu výroby jogurtu) a tím i udržitelnější produkce.

Oba popsané systémy senzorů mohou být také integrovány do automatizovaných výrobních linek pro nepřetržitou kontrolu kvality během výroby. To může pomoci minimalizovat produkci vadných nebo nekvalitních výrobků a zvýšit celkovou efektivitu a produktivitu výroby.

5. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Předkládaná habilitační práce se pohybuje na rozhraní několika odlišných oborů (mikroelektronika, chemická analýza, potravinářství) a nelze ji proto zařadit pouze do jednoho z nich. Díky tomuto propojení však odpovídá na aktuální poznatky a trendy (např. udržitelná produkce a spotřeba). Práce shrnuje nové vědecké poznatky zjištěné autorem práce o zpřesnění identifikace vzorku pachů (se zaměřením na pachy potravin) pomocí levných chemorezistivních senzorů používaných v elektrochemických nosech a o charakterizaci vlastností termodynamických senzorů a zpřesnění identifikace stavu potravin pomocí nich. Na základě těchto informací mohou být vykonána rozhodnutí ve výrobním systému (např. dřívější odstavení již ukončeného fermentačního procesu ve výrobním tanku), které mohou přinést nejen časovou úsporu (materiál může odejít na další výrobní operaci dříve), ale i úsporu energetickou, která nemusí být zanedbatelná ve větších, obvykle automatizovaných, výrobních procesech.

Práce dále přináší nové informace o identifikaci výrobků a monitorování průběhu potravinářských procesů s přidavkem netradičních komodit. Práce je zaměřena na jedlý hmyz a využití surovin rostlinného původu v netradičních kombinacích (např. využití hroznových výlisků jako součástí těst). Z tohoto důvodu nemusí být tyto části práce využívány pouze v technických oborech, např. při monitorování a automatizaci těchto procesů, ale i v potravinářství v oblasti využití a zpracování těchto komodit.

Z předložené habilitační práce vyplývají její následující významné přínosy:

- a) Přesnost identifikace vzorků pomocí levných chemorezistivních snímačů používaných u elektronických nosů je možné zvýšit jejich předzpracováním separací pomocí 3D tištěných FDM kapilár z běžného materiálu (PLA).
- b) Pomocí levných chemorezistivních snímačů je možné rozlišovat jednotlivé vzorky potravinářských komodit a jejich stav, včetně kulinářské úpravy. Protože se práce zaměřuje zejména na jedlý hmyz jako netradiční komoditu (jeho stavy při kulinářním zpracování, jeho vliv jako aditiva), mohou nové poznatky přispět k rozšíření chovů hmyzu a automatizaci výrobního a zpracovatelského procesu.
- c) Při využití monitorování stavu procesů pomocí termodynamických senzorů je možné signál z TDS vyhodnotit jako jeden z klíčových parametrů a na jeho základě proces ovládat a automatizovat. Jde např. o stanovení konce procesu dříve, než by bylo prokázáno jinými metodami. Tím může dojít ušetření času a vynaložené energie na proces, a případných dalších manipulací s komoditou.
- d) Byly získány a popsány některé poznatky zaměřující se na uspořádání a konstrukci termodynamických senzorů. Tyto poznatky mohou být dále využity v rámci dalších návrhů praktických konstrukcí zařízení, které využívají termodynamické senzory, jako jednoho z příznaků popisujících stav sledovaného procesu a jedné z rozhodovacích úrovní pro automatizaci těchto procesů.

Mimo zmíněné oblasti práce přispěla svým přínosem i v dalších případech, které jsou popsány v textu uvedeném výše.

6. ZÁVĚR

Předložená habilitační práce se zabývá prohloubením a rozšířením znalostí o senzorech na principu termodynamické bilanční rovnováhy a jejich využití v oblasti monitorování a řízení procesů v potravinářství. Dále se práce věnuje využití levných elektrochemických senzorů, které mohou být použité jako vstupní jednotky pro elektronický nos v oblasti potravinářství.

Práce objasňuje princip, funkci a chování TDS při podmínkách měření v tekutinách. Protože značnou nevýhodou těchto senzorů je závislost na konkrétní konfiguraci, soustředila se práce nejdříve na charakterizaci výstupního signálu ze senzorů v různých konfiguracích a stanovuje optimální konfiguraci čidel senzoru vzhledem k použité měřicí nádobě. Kapitola dále ukazuje využití senzorů u různých potravinářských procesů, zejména se zaměřením na fermentační procesy (např. při výrobě jogurtů). Značná část je věnována fermentačním procesům u těst. Mimo tradičních surovin jsou však u těchto těst využity i netradiční potravinářské komodity, zejména jedlý hmyz.

Jednoduchý elektronický nos a jeho využití v potravinářství je popsáno v dalších kapitolách práce, které se v tomto směru zaměřují hlavně na možnost zpřesnění výsledků získaných z levných chemorezistivních senzorů. Jednou z metod je inovativní metoda využití techniky 3D tisku pro výrobu separační kolonky a měřicí komůrky. Tato nenákladná technika ukazuje možnost zpřesnění naměřených výsledků rozdělením vzorku plynu ještě před detekcí plynovým čidlem obdobně jako u výkonových plynových chromatografů. Sledování časového spektra a jeho porovnání se spektry uloženými v knihovně systému může přinést další zpřesnění výsledků. Systém tak relativně nenákladnou metodou umožňuje analyzovat i složitější vzorky, než by dokázal při běžné aplikaci čidla. To rozšiřuje jeho možnosti při relativně nízké ceně zařízení. Vzhledem k vysokému potenciálu se v této oblasti plánuje další výzkum, zejména směrem k automatizaci výrobních procesů.

Obdobně jako bylo popsáno využití termodynamických senzorů při použití netradičních komodit v potravinářství, jsou popsány i charakteristiky netradiční komodity jedlého hmyzu získané pomocí elektronického nosu. V práci je tato tematika jen stručně naznačena, avšak více informací je v článcích uvedených v přílohách práce. S oblastí použití souvisí i jedna z posledních kapitol, která navrhuje a přibližuje využití a aplikaci elektronického nosu v potravinářské oblasti.

Elektronický nos a termodynamické senzory založené na bilančním principu mohou být z důvodu nízké ceny a snadné aplikovatelnosti v rámci automatizace výrobních procesů snadno použitelné v širokém rozsahu nejen potravinářských aplikací. To může mít významný dopad z hlediska ceny a energetické náročnosti výrobního procesu. V širším kontextu to může znamenat i dopad na výrobní proces z environmentálního hlediska a jeho výsledné udržitelnosti. Další výzkum v této oblasti je proto stěžejní a podporovaný na evropské i světové úrovni.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVÁ, Anna; BORKOVCOVÁ, Marie; MLČEK, Jiří; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al., 2017. Electronic nose in edible insects area. online. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 11, č. 1, s. 446-451. ISSN 1337-0960. Dostupné z: <https://doi.org/10.5219/785>. [cit. 2023-12-10].
- ADAMEK, Martin; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; VOJACKOVA, Klara; FAMERA, Oldrich et al., 2020. Sensor Systems for Detecting Dough Properties Fortified with Grape Pomace and Mealworm Powders. online. *Sensors*. roč. 20, č. 12, s. 1-13. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s20123569>. [cit. 2023-12-03].
- ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVÁ, Anna; MLČEK, Jiří; BORKOVCOVÁ, Marie a BEDNÁŘOVÁ, Martina, 2018. Acceptability and sensory evaluation of energy bars and protein bars enriched with edible insect. online. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 12, č. 1, s. 431-437. ISSN 1337-0960. Dostupné z: <https://doi.org/10.5219/925>. [cit. 2023-12-10].
- ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVA, Anna; ŘEZNÍČEK, Michal a KOUŘIMSKÁ, Lenka, 2016. The estimated possibilities of process monitoring in milk production by the simple thermodynamic sensors. online. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 10, č. 1, s. 643-648. ISSN 1337-0960. Dostupné z: <https://doi.org/10.5219/462>. [cit. 2023-12-10].
- ADAMEK, Martin; BURAN, Martin; REZNICEK, Michal; ADAMKOVA, Anna; BUCKOVA, Martina et al., 2021. The E-nose for Orientation Screening in the Food Industry. online. In: *2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, s. 1-4. ISBN 978-1-6654-1477-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISSE51996.2021.9467518>. [cit. 2024-02-15].
- ADAMEK, Martin; MATYAS, Jiri; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; BURAN, Martin et al., 2022. A Study on the Applicability of Thermodynamic Sensors in Fermentation Processes in Selected Foods. online. *Sensors*. roč. 22, č. 5, s. 1-16. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22051997>. [cit. 2023-12-04].
- ADAMEK, Martin; MLCEK, Jiri; SKOWRONKOVA, Nela; ZVONKOVA, Magdalena; JASSO, Miroslav et al., 2023. 3D Printed Fused Deposition Modeling (FDM) Capillaries for Chemiresistive Gas Sensors. online. *Sensors*. roč. 23, č. 15, s. 1-17. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23156817>. [cit. 2023-11-24].
- ADÁMEK, Martin; MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; BORKOVCOVÁ, Marie; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al., 2019. Unusual aspects of the fat content of mealworm larvae as a novel food. online. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. roč. 13, č. 1, s. 157-162. ISSN 1337-0960. Dostupné z: <https://doi.org/10.5219/1089>. [cit. 2023-12-10].

- ADÁMEK, Martin; ŘEZNÍČEK, Michal a ADÁMKOVÁ, Anna, 2010. The Simple Thermodynamic Sensors for Process Monitoring in Milk Production. *ElectroScope*. č. 3, s. 1-3. ISSN 1802-4564.
- ADÁMEK, Martin a ŘEZNÍČEK, Michal, 2013. *Návod do cvičení předmětu MMTE*. PDF. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky.
- ADAMEK, Martin; ZVONKOVA, Magdalena; BURESOVA, Iva; BURAN, Martin; SEVCIKOVA, Veronika et al., 2023. Use of a Thermodynamic Sensor in Monitoring Fermentation Processes in Gluten-Free Dough Proofing. online. *Sensors*. roč. 23, č. 1, s. 1-17. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23010534>. [cit. 2023-12-04].
- ADÁMKOVÁ, Anna; TANČINOVÁ, Dana a ADÁMEK, Martin, 2013. The Estimated Possibilities of Thermodynamic Sensors in Food Industry. online. In: *MendelNet 2013 – Proceedings of International PhD Students Conference*. Brno: Mendel University in Brno, s. 550-554. ISBN 978-80-7375-908-7. Dostupné z: https://mnet.mendelu.cz/mendelnet2013/articles/44_adamkova_924.pdf. [cit. 2024-02-18].
- ALMAZOV, Denys, 2019. *Programové vybavení pro zpracování vícerozměrných dat ze senzorů plynů*. PDF, Bakalářská práce, vedoucí Martin Adámek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119429>.
- ANTON PAAR GMBH, 2022. *Beer Fermentation Monitoring: Datasheet D32IA009EN-C*. 1st. Dostupné z: https://www.mtbrandao.com/files/products/D32IA009EN_C_AppRep_Beer_FermentationMonitoring.pdf. [cit. 2022-01-04].
- BK, , 2000. Strojové vnímání vůní a zápachů. online. *Automa – časopis pro automatizační techniku*, s. r. o. roč. 6, č. 1, s. 1. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/strojove-vnimani-vuni-a-zapachu-2000_01_27557_1224/. [cit. 2024-02-17].
- COURTIN, Pascal a RUL, Françoise, 2004. Interactions between microorganisms in a simple ecosystem: yogurt bacteria as a study model. online. *Le Lait*. roč. 84, č. 1-2, s. 125-134. ISSN 0023-7302. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/lait:2003031>. [cit. 2023-11-28].
- KRÁL, Václav (ed.), 1972. *Malý encyklopedický slovník A-Ž*. 1. vyd. Praha: Academia.
- GRASSI, Silvia; AMIGO, José; LYNDGAARD, Christian; FOSCHINO, Roberto a CASIRAGHI, Ernestina, 2014. Beer fermentation: Monitoring of process parameters by FT-NIR and multivariate data analysis. online. *Food Chemistry*. roč. 155, s. 279-286. ISSN 03088146. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.060>. [cit. 2023-11-28].

- GROB, Robert a BARRY, Eugene (ed.), 2004. *Modern Practice of Gas Chromatography*. online. Wiley. ISBN 9780471229834. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471651141>. [cit. 2024-02-15].
- HALASZ, Anna a LASZTITY, Radomir, 2019. *Use of Yeast Biomass in Food Production*. 1st ed. Budapest, Hungary: CRC Press. ISBN 978-0367450724.
- HASIL, Radim, 2011. *Využití umělého nosu v senzorické analýze*. Bakalářská práce, vedoucí Miroslav Fišera. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav technologie a mikrobiologie potravin. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/15395>.
- HIRASAWA, Reiko a YOKOIGAWA, Kumio, 2001. Leavening ability of baker's yeast exposed to hyperosmotic media. online. *FEMS Microbiology Letters*. roč. 194, č. 2, s. 159-162. ISSN 03781097. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb09462.x>. [cit. 2024-02-14].
- HUIS, Arnold; VAN ITTERBEECK, Joost; KLUNDER, Harmke; MERTENS, Esther; HALLORAN, Afton et al., 2013. *Edible insects: future prospects for food and feed security*. online. FAO forestry paper, 171. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 978-92-5-107595-1. Dostupné z: <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>. [cit. 2024-06-23].
- CHANDRA, Shanel; CHAPMAN, James; POWER, Aoife; ROBERTS, Jess a COZZOLINO, Daniel, 2017. The Application of State-of-the-Art Analytic Tools (Biosensors and Spectroscopy) in Beverage and Food Fermentation Process Monitoring. online. *Fermentation*. roč. 3, č. 4. ISSN 2311-5637. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fermentation3040050>. [cit. 2023-11-28].
- JANOŠÍKOVÁ, Pavla, 2022. *Inovace experimentálního e-nosu pro analýzu pachů v potravinářství*. online, Diplomová práce, vedoucí Martin Adámek. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/204949>. [cit. 2024-02-17].
- KALČÍK, Josef, 1963. *Technická termodynamika*. 2. vyd. Praha: Československá akademie věd.
- KHEILOVÁ, Milena, 1998. *Termodynamika*. Vyd. 2. Brno: VUTIUM. ISBN 80-214-0997-5.
- KURZ, T.; FELLNER, M.; BECKER, T. a DELGADO, A., 2001. Observation and Control of the Beer Fermentation Using Cognitive Methods. online. *Journal of the Institute of Brewing*. roč. 107, č. 4, s. 241-252. ISSN 00469750. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2001.tb00096.x>. [cit. 2024-02-20].
- LUCKLUM, F.; JANSSEN, S.; LANG, W. a VELLEKOOP, M.J., 2015. Miniature 3D Gas Chromatography Columns with Integrated Fluidic Connectors Using High-resolution Stereolithography Fabrication. online. *Procedia Engineering*. roč. 120, s. 703-706. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.761>. [cit. 2024-02-14].

- MANCINI, Simone; MORUZZO, Roberta; RICCIOLI, Francesco a PACI, Gisella, 2019. European consumers' readiness to adopt insects as food. A review. online. *Food Research International*. roč. 122, s. 661-678. ISSN 09639969. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.041>. [cit. 2024-02-18].
- MZE ČR, 2018. *Zásady správné zemědělské a výrobní praxe produkce hmyzu určeného pro lidskou spotřebu*. online PDF. Praha: Ministerstvo zemědělství (MZe), Odbor bezpečnosti potravin. ISBN 978-80-7434-420-6. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/576458/Zasady_produkce_hmyzu_4__2_.pdf. [cit. 2.10.2021].
- NEAL, Dick, 2004. *Introduction to Population Biology*. 1st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN 978-0521532235. [cit. 2024-02-18].
- PANOVSKÁ, Zdeňka, b. r. *Senzorická analýza: Čich*. PDF. Praha. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/panovskz/Přednášky/6.pdf>. [cit. 17.2.2024]. Učební texty.
- PATOČKA, Jiří; KUČA, Kamil a JUN, Daniel, 2006. Od rajské vůně po tchoří puch. online. *Vesmír* 85. roč. 85, s. 653-654. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2006/cislo-11/od-rajske-vune-po-tchori-puch.html>. [cit. 2024-06-23].
- PERSAUD, Krishna a DODD, George, 1982. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. online. *Nature*. roč. 299, č. 5881, s. 352-355. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/299352a0>. [cit. 2024-02-17].
- RAMOS-ELORDUY, Julieta a MENZEL, Peter, 1998. *Creepy crawly cuisine: the gourmet guide to edible insects*. Rochester, VT: Park Street Press. ISBN 978-0892817474.
- RODRÍGUEZ MÉNDEZ, María Luz; PREEDY, Victor R (ed.), 2016. *Electronic noses and tongues in food science*. 1st ed. Tokyo: Academic Press. ISBN 978-0128002438.
- RUSINEK, Robert; GANCARZ, Marek a NAWROCKA, Agnieszka, 2020. Application of an electronic nose with novel method for generation of smellprints for testing the suitability for consumption of wheat bread during 4-day storage. online. *LWT*. roč. 117, s. 1-7. ISSN 00236438. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108665>. [cit. 2024-02-17].
- ŘEZNÍČEK, Michal, 2005. Process energy balance monitoring. In: *Proceedings of the 11th Conference and Competition STUDENT EEICT 2005*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií, s. 33-34. ISBN 80-214-2888-0.
- ŘEZNÍČEK, Michal, 2014. *Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy*. online, Disertační práce, vedoucí Ivan Szendiuch. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Dostupné z:

- https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=94190. [cit. 2023-11-27].
- ŘEZNÍČEK, Zdeněk (Česká republika), 2006. *Způsob vztažného měření teplot a rozdílu teplot, asymetrický teplotní senzor a asymetrický vztažný člen pro provádění způsobu*. PDF. Zdeněk Řezníček (vynálezce). Přihl.: 10.08.1999. Uděl.: 19.07.2006. Patentový spis CZ 297066 B6. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/1999-2843&plang=CS. [cit. 2023-11-27].
- ŘEZNÍČEK, Zdeněk; SZENDIUCH, Ivan; ŘEZNÍČEK, Michal a ŘEZNÍČEK, Zdeněk, 2008. Thick film double thermodynamic sensor system. online. In: *2008 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference*. Greenwich, UK: IEEE, s. 1301-1304. ISBN 978-1-4244-2813-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ESTC.2008.4684542>. [cit. 2024-11-27].
- ŘEZNÍČEK, Zdeněk; TVAROŽEK, Vladimír; ŘEZNÍČEK, Michal a SZENDIUCH, Ivan, 2005. Temperature Balanced Process Media Energy Activity Monitoring. In: *EDS'05. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2005: Brno, Czech Republic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 94-100. ISBN 80-214-2990-9.
- ŘEZNÍČEK, Zdeněk; TVAROŽEK, Vladimír; SZENDIUCH, Ivan a ŘEZNÍČEK, Michal, 2006. Hybrid Constant Temperature Regulator. online. In: *7th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*. 1. Como, Italy: IEEE, s. 1-4. ISBN 1-4244-0275-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ESIME.2006.1644021>. [cit. 2024-02-18].
- SANDRON, S.; HEERY, B.; GUPTA, V.; COLLINS, D.; NESTERENKO, E. et al., 2014. 3D printed metal columns for capillary liquid chromatography. online. *The Analyst*. roč. 139, č. 24, s. 6343-6347. ISSN 0003-2654. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C4AN01476F>. [cit. 2024-02-15].
- SEBERA, Martin, 2012. *Statistika - vícerozměrné metody*. online PDF. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/fsps/jaro2022/dc4004/um/skripta_vicerozmerna_statistika-sebera-fsps-10.3.2013.pdf. [cit. 2024-02-20]. Výukový text.
- SEMĀAN, Š., 1994. *Mliekárstvo (Dairy technology)*. Nitra, Slovakia: SPU v Nitre. ISBN 80-7137-157-2.
- SEVCIKOVA, Veronika; ADAMEK, Martin; SEBESTIKOVA, Romana; BURESOVA, Iva; BURAN, Martin et al., 2024. New Insights into the Comprehensive System of Thermodynamic Sensors and Electronic Nose and Its Practical Applications in Dough Fermentation Monitoring. online. *Sensors*. roč. 24, č. 2, s. 1-15. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s24020352>. [cit. 2024-02-03].
- SHIMADZU HANDELS GMBH, 2023. *Gas Chromatography*. online. In: SHIMADZU HANDELS GMBH. SHIMADZU Europe GmbH. Dostupné z: <https://www.shimadzu.cz/gas-chromatography>. [cit. 2023-07-27].

- STETTER, Joseph a PENROSE, William, 2001. THE ELECTROCHEMICAL NOSE. online. In: NAGY, Zoltan (ed.). THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, INC. (ECS). *Electrochemistry Encyclopedia*. Chapel Hill: The Electrochemical Society, Inc. (ECS), s. 1. Dostupné z: <https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-n01-nose.htm>. [cit. 2024-02-17].
- SVOBODA, Miroslav, 2022. Potravinářská komora ČR znovu vyzývá vládu k řešení energetické krize, výzvu podepsalo dvacet profesních sdružení z potravinářského odvětví. online. In: POTRAVINÁŘSKÁ KOMORA ČR. *Informační systém PK ČR*. Dostupné z: <https://www.foodnet.cz/en/newsletter/4972-potravinarska-komora-cr-znovu-vyzyva-vladu-k-reseni-energeticke-krize-vyzvu-podepsalo-dvacet-profesnich-sdruzeni-z-potravinarskeho-odvetvi>. [cit. 2024-02-17].
- TARKIAINEN, V; KOTIAHO, T; MATTILA, I; VIRKAJARVI, I; ARISTIDOU, A et al., 2005. On-line monitoring of continuous beer fermentation process using automatic membrane inlet mass spectrometric system. online. *Talanta*. roč. 65, č. 5, s. 1254-1263. ISSN 00399140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.08.051>. [cit. 2023-11-28].
- ÚJČ AV ČR, , 2017–2024. *Akademický slovník současné češtiny*. online. Praha: Ústav pro jazyk český AV ČR, v. v. i. Dostupné z: <https://slovníkcestiny.cz>. [cit. 2024-02-17].
- VEČEŘOVÁ, Dana, 2022. *Výzva představenstva PK ČR Vládě ČR k řešení energetické krize*. PDF. Praha: Potravinářská komora ČR. Dostupné z: [https://ipodpora.odbory.info/dms/soubory/index?file=Vyzva predstavenstva PK CR Vlade CR k reseni energeticke krize_20221012065415.pdf](https://ipodpora.odbory.info/dms/soubory/index?file=Vyzva%20predstavenstva%20PK%20CR%20Vlade%20CR%20k%20reseni%20energeticke%20krize_20221012065415.pdf). [cit. 2024-02-17].
- WALKER, Graeme M., 1998. *Yeast Physiology and Biotechnology*. 1st. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. ISBN 978-0-471-96446-9.
- WALSTRA, P.; WOUTERS, J.T.M. a GEURTS, T., 2005. *Dairy Science and Technology*. 2nd. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-8247-2763-5.
- ZIELIŃSKA, Ewelina; BARANIAK, Barbara; KARAŚ, Monika; RYBCZYŃSKA, Kamila a JAKUBCZYK, Anna, 2015. Selected species of edible insects as a source of nutrient composition. online. *Food Research International*. roč. 77, s. 460-466. ISSN 09639969. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.008>. [cit. 2024-02-18].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Schematické uspořádání vztažného termodynamického senzoru v bilančním zapojení (demonstrace principu). Upraveno dle (Adámek, Řezníček, 2013).....	13
Obr. 2.2:	Skupiny vlivů, které působí na termodynamický senzor. Upraveno dle (Adámková et al., 2013).....	13
Obr. 4.1:	Termodynamický senzor vyrobený na korundovém substrátu s platinovou odporovou vrstvou (Adámek et al., 2010).	17
Obr. 4.2:	Umístění čidel v oddělených tekutinách (foto autor).	17
Obr. 4.3 :	Jedny z prvních měřicích pracovišť v autorově výzkumu pro měření s termodynamickými senzory na principu bilanční rovnováhy (foto autor).	18
Obr. 4.4 :	Měřicí přípravek založený na mikropočítači ESP32 (Adamek et al., 2022).	19
Obr. 4.5:	Schéma konstrukce termodynamického systému s čidly umístěnými vně měřicí nádoby (Adamek et al., 2022).....	19
Obr. 4.6:	Různé umístění jednotlivých čidel TDS vůči nádobě. Křížky znázorňují polohu čidla T1 (červený křížek) a čidla T2 (modrý křížek) (Adamek et al., 2022).	19
Obr. 4.7:	Výstupní odezva TDS (modrá) a klasického teplotního čidla (červená) při různém umístění čidel termodynamického systému. Písmenné značení odpovídá písmennému značení pozic na Obr. 4.6 (Adamek et al., 2022).....	20
Obr. 4.8:	Výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (X1 – modrá křivka, X2 – oranžová křivka, X3 – šedá křivka) se senzory zapojenými podle konfigurace d) na Obr. 4.6 (Adamek et al., 2022).....	21
Obr. 4.9:	Pozice zdroje tepla (p1 - p21) po upřesnění konfigurace čidel TDS k měření změn výstupní odezvy (Sevcikova et al., 2024).	22
Obr. 4.10:	Upřesněná průměrná výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (p1 – p12) (Sevcikova et al., 2024).	22
Obr. 4.11:	Závislost vrcholové hodnoty prvního píku výstupní odezvy TDS pro různou vzdálenost pozice zdroje tepla (p1 – p9) od snímače TDS1. Hodnota startovací úrovně signálu byla položena napětí $U = 0$ V (Sevcikova et al., 2024).	23
Obr. 4.12:	Upřesněná průměrná výstupní odezva termodynamického systému při různé pozici zdroje tepla (p13 – p21) (Sevcikova et al., 2024).	23
Obr. 4.13:	Závislost vrcholové hodnoty prvního píku výstupní odezvy TDS pro různé pozice zdroje tepla mimo přímou vzdálenost	

	(p13 – p21). Hodnota startovací úrovně signálu byla položena napětí $U = 0$ V (Sevcikova et al., 2024).	24
Obr. 4.14:	Monitorování aktivity kvasinek (droždí) (Adámek et al., 2010).....	25
Obr. 4.15:	Příklad výstupní odezvy termodynamického systému pro proces šíření a proces výroby jogurtu (Adámek et al., 2016).	26
Obr. 4.16:	Průběhy závislostí výstupního napětí a teploty při sledování procesu výroby jogurtu pomocí termodynamického systému. Popis bodů: Zelená - Začátek měření, modrá - vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přísávkem, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá - konec měření (Adamek et al., 2022).	27
Obr. 4.17:	Monitorování průběhu fermentace jogurtu bez přísávkem aditiva pro termodynamický systém při rozmítání teploty ohřevu Popis bodů: Zelená - Začátek měření, modrá - vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přísávkem, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá - konec měření (Adamek et al., 2022).	27
Obr. 4.18:	Závislost výstupního napětí na teplotě v průběhu jednotlivých fázích fermentace při výrobě jogurtů pro termodynamický systém. Popis bodů: Zelená – Začátek měření, modrá – vložení jogurtové kultury do mléka nebo mléka s přísávkem, červená - 6 hodin po začátku měření (předpokládaná doba ukončení fermentace), černá – konec měření (Adamek et al., 2022).	28
Obr. 4.19:	Monitorování fermentačního procesu u těst s přísávkem netradiční komodity (Adamek et al., 2020).	29
Obr. 4.20:	Monitorování kynutí těsta na pizzu bez přísávkem (0 %) a s přísávkem moučky z larev potemníka moučného (5 % a 10 %) ve dvou termodynamických systémech S1 a S2 (Adamek et al., 2022).	30
Obr. 4.21:	Porovnání výstupního signálu U_{out} z experimentálního termodynamického systému s výstupními signály z profesionálního reofermentometru Rheo F-4 (Chopin, Francie) u bezlepkových těst (Adamek et al., 2023).....	30
Obr. 4.22:	Porovnání výstupního signálu U_{out} z experimentálního termodynamického systému s výstupními signály z profesionálního reofermentometru Rheo F-4 (Chopin, Francie) u pšeničných těst (Sevcikova et al., 2024).	31
Obr. 4.23:	Monitorování procesu svrchního kvašení mladiny. Popis křivek - oranžová - Výstupní napětí TDS U [V]; modrá - teplota plastové fermentační nádoby měřená klasickým teplotním snímačem (Adamek et al., 2022).	33

Obr. 4.24: 3D tištěná jednopatrová kapilára (Adamek et al., 2023).	34
Obr. 4.25: RED snímač – Výstupní odezva a absolutní přírůstek. Číslo označuje počet vrstev (L - layers) kapiláry. „0L“ značí přímý nástřík do měřicí komůrky. „p“ značí poloviční rychlost nosného plynu (Adamek et al., 2023).	35
Obr. 4.26: Absolutní přírůstek výstupní odezvy senzorů při použití třípatrové kapiláry a poloviční rychlosti průtoku plynu pro vzorky „Vodka“ a „Tuzemský“ (Adamek et al., 2023).	35
Obr. 4.27: Absolutní přírůstek výstupní odezvy senzorů při použití třípatrové kapiláry pro různé dostupné vzorky (Adamek et al., 2023).	36
Obr. 4.28: Použití třech různých chemorezistivních senzorů při identifikaci úpravy jedlého hmyzu (Adamek et al., 2017).	37
Obr. 4.29: Využití PCA analýzy při vyhodnocení signálů z experimentálního e-nosu u vzorků másla, českých piv a stanovení čerstvosti salátu (Adamek et al., 2021).	38

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4.1: Korelace křivek naměřených profesionálním reofermentometrem Rheo F-4 s křivkou z experimentálního TDS u pšeničných těst. Červeně vyznačené koeficienty jsou statisticky významné (Sevcikova et al., 2024).	32
---	----

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CO	oxid uhelnatý
Data	hodnota na výstupu A/D převodníku mikropočítače
e-nos	elektronický nos
EU	Evropská unie (European Union)
FAO UN	Organizace pro výživu a zemědělství Spojených národů (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
H ₂ S	sírovodík (systematický název sulfan)
HACCP	System analýzy rizika a stanovení kritických kontrolních bodů (Hazard Analysis and Critical Control Points)
MZe	Ministerstvo zemědělství České republiky
NH ₃	amoniak (systematický název azan, triviální název čpavek)
NO ₂	oxid dusičitý
t	čas
T	teplota [°C]
TDS	termodynamický systém na principu bilanční rovnováhy (zkráceně termodynamický senzor)
U	elektrické napětí [V]

VYBRANÉ PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Původní vědecké články v impaktovaném časopise indexované v databázi WoS
(Úplná citace, seříděno podle roku vydání)

- PRASEK, Jan; ADAMEK, Martin; HUBALEK, Jaromir; ADAM, Vojtech; TRNKOVA, Libuse et al. New Hydrodynamic Electrochemical Arrangement for Cadmium Ions Detection Using Thick-Film Chemical Sensor Electrodes. *Sensors*. 2006, roč. 6, č. 11, s. 1498-1512. ISSN 1424-8220. WOS: 000244633800005. (IF 1,373; Q1)
- HUBALEK, Jaromir; HRADECKY, Jan; ADAM, Vojtech; KRYSTOFOVA, Olga; HUSKA, Dalibor et al. Spectrometric and Voltammetric Analysis of Urease – Nickel Nanoelectrode as an Electrochemical Sensor. *Sensors*. 2007, roč. 7, č. 7, s. 1238-1255. ISSN 1424-8220. WOS: 000248319500013. (IF 1,573; Q1)
- PRASEK, J; HUBALEK, J; ADAMEK, M; JASEK, O a ZAJICKOVA, L. Nanopatterned working electrode with carbon nanotubes improving electrochemical sensors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2007, roč. 221, č. 3, s. 115-119. ISSN 1740-3499. WOS: 000218367900006. (N/A)
- ADÁMKOVÁ, Anna; MLČEK, Jiří; KOUŘIMSKÁ, Lenka; BORKOVCOVÁ, Marie; BUŠINA, Tomáš et al. Nutritional Potential of Selected Insect Species Reared on the Island of Sumatra. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017, roč. 14, č. 5, s. 1-10. ISSN 1660-4601. WOS: 000404106400069. (IF 2,145; Q2)
- MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; ADÁMEK, Martin; BORKOVCOVÁ, Marie; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al. Selected nutritional values of field cricket (*Gryllus assimilis*) and its possible use as a human food. *Indian Journal of Traditional Knowledge*. 2018, roč. 17, č. 3, s. 518-524. ISSN 0972-5938. WOS: 000439956900016. (IF 0.920; Q3)
- MLCEK, Jiri; ADAMKOVA, Anna; ADAMEK, Martin; BORKOVCOVA, Marie; BEDNAROVA, Martina et al. Fat from Tenebrionidae Bugs – Sterols Content, Fatty Acid Profiles, and Cardiovascular Risk Indexes. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2019, roč. 69, č. 3, s. 247-254. ISSN 1230-0322. WOS: 000483942700003. (IF 1.986; Q3)
- VALÁŠEK, Pavel; MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; KŘIVÁNKOVÁ, Milada; VALÁŠEK JR, Pavel et al. Comparison of contents of selected esters, higher alcohols and total content of polyphenolic substances in wines of the varieties 'Chardonnay' and 'Riesling' by vintage. *Mitteilungen Klosterneuburg*. 2019, roč. 69, č. 2, s. 115-123. ISSN 0007-5922. WOS: 000492459400005. (IF 0.545; Q4)
- BORKOVCOVA, Marie; FISER, Vladimir; BEDNAROVA, Martina; HAVLICEK, Zdenek; ADÁMKOVÁ, Anna et al. Effect of Accumulation of Heavy Metals in the Red Fox Intestine on the Prevalence of Its Intestinal Parasites. *Animals*. 2020, roč. 10, č. 2, s. 1-11. ISSN 2076-2615. WOS: 000521356600020. (IF 2,752; Q1)
- ADAMEK, Martin; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; VOJACKOVA, Klara; FAMERA, Oldrich et al. Sensor Systems for Detecting Dough Properties Fortified with Grape Pomace and Mealworm Powders. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 12, s. 1-13. ISSN 1424-8220. WOS: 000553922200001. (IF 3,576; Q1)
- MLCEK, Jiri; ADAMKOVA, Anna; ADAMEK, Martin; FIŠERA, Miroslav; BORKOVCOVA, Marie et al. Effect of temperature and feed on the mineral content and the content of selected heavy metals in mealworm. *Journal of Elementology*. 2020, roč. 25, č. 3, s. 1077-1088. ISSN 1644-2296. WOS: 000580459000008. (IF 0.949; Q4)
- ADÁMKOVÁ, Anna; MLČEK, Jiří; ADÁMEK, Martin; BORKOVCOVÁ, Marie; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al. *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) - Optimization of Rearing Conditions to Obtain Desired Nutritional Values. *Journal of Insect Science*. 2020, roč. 20, č. 5, s. 1-10. ISSN 1536-2442. WOS: 000582418100001. (IF 1.857; Q2)

- VOLEK, Zdeněk; ADÁMKOVÁ, Anna; ZITA, Lukáš; ADÁMEK, Martin; PLACHÝ, Vladimír et al. The effects of the dietary replacement of soybean meal with yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) on the growth, nutrient digestibility and nitrogen output of fattening rabbits. *Animal Feed Science and Technology*. 2021, roč. 280, č. 1, s. 1-6. ISSN 0377-8401. WOS: 000703431100012. (IF 3.313; Q1)
- MLČEK, Jiří; ADÁMEK, Martin; ADÁMKOVÁ, Anna; MATYÁŠ, Jiří; BUČKOVÁ, Martina et al. Feed Parameters Influencing the Breeding of Mealworms (*Tenebrio molitor*). *Sustainability*. 2021, roč. 13, č. 23, s. 1-14. ISSN 2071-1050. WOS: 000735091000001. (IF 3.889; Q2)
- MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; ADÁMEK, Martin; BORKOVCOVÁ, Marie; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al. Selected aspects of edible insect rearing and consumption – A review. *Czech Journal of Food Sciences*. 2021, roč. 39, č. 3, s. 149-159. ISSN 1212-1800. WOS: 000669849200001. (IF 1.300; Q4)
- ADAMEK, Martin; MATYAS, Jiri; ADAMKOVA, Anna; MLCEK, Jiri; BURAN, Martin et al. A Study on the Applicability of Thermodynamic Sensors in Fermentation Processes in Selected Foods. *Sensors*. 2022, roč. 22, č. 5, s. 1-16. ISSN 1424-8220. WOS: 000768847900001. (IF 3,931; Q2)
- BORKOVCOVÁ, Marie; MLČEK, Jiří; ADÁMKOVÁ, Anna; ADÁMEK, Martin; BEDNÁŘOVÁ, Martina et al. Use of Foods Based on Bee Drone Brood: Their Sensory and Microbiological Evaluation and Mineral Composition. *Sustainability*. 2022, roč. 14, č. 5, s. 1-13. ISSN 2071-1050. WOS: 000771179700001. (IF 3,877; Q2)
- VALŠÍKOVÁ-FREY, Magdaléna; MLČEK, Jiří; BUČKOVÁ, Martina; ADÁMKOVÁ, Anna; ADÁMEK, Martin et al. Influence of Varieties and Mulching on the Quality and Quantity of Vegetable Pepper Yield. *Horticulturae*. 2022, roč. 8, č. 11, s. 1-14. ISSN 2311-7524. WOS: 000883968300001. (IF 2,923; Q1)
- ADAMEK, Martin; ZVONKOVA, Magdalena; BURESOVA, Iva; BURAN, Martin; SEVCIKOVA, Veronika et al. Use of a Thermodynamic Sensor in Monitoring Fermentation Processes in Gluten-Free Dough Proofing. *Sensors*. 2023, roč. 23, č. 1, s. 1-17. ISSN 1424-8220. WOS: 000909170000001. (IF 3,931; Q2)
- ADAMEK, Martin; MLCEK, Jiri; SKOWRONKOVA, Nela; ZVONKOVA, Magdalena; JASSO, Miroslav et al. 3D Printed Fused Deposition Modeling (FDM) Capillaries for Chemiresistive Gas Sensors. *Sensors*. 2023, roč. 23, č. 15, article 6817, s. 1-17. ISSN 1424-8220. WOS: 001045730900001. (IF 3,931; Q2)
- VOLEK, Zdeněk; ZITA, Lukáš; ADÁMKOVÁ, Anna; ADÁMEK, Martin; MLČEK, Jiří et al. Dietary Inclusion of Crickets (*Acheta domesticus*) and Yellow Mealworm Meal (*Tenebrio molitor*) in Comparison with Soybean Meal: Effect on the Growth, Total Tract Apparent Digestibility, and Nitrogen Balance of Fattening Rabbits. *Animals*. 2023, roč. 13, č. 10, s. 1-10. ISSN 2076-2615. WOS: 000994609100001. (IF 3,001; D1)

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA



Martin Adámek

Datum narození: 12/09/1973 | **Státní příslušnost:** Česká republika | **Telefonní číslo:**

(+420) 778788936 (Mobilní telefon) | **Telefonní číslo:** (+420) 576035079 (Pracovní) | **E-mailová adresa:**

m2adamek@utb.cz | **Adresa:** ÚAŘT FAI UTB ve Zlíně, Nad Stráněmi 4511, 760 05, Zlín 5, Česko (Pracovní)

● PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

13/07/1992 – 15/09/1992 Velešovice, Česko

13.7.1992-15.9.1992 PRACOVNÍK ZEMĚDĚLSKÉ VÝROBY JZD VELEŠOVICE – HOLUBICE

04/08/1994 – 30/06/1995 Brno, Česko

POMOCNÁ SÍLA - ÚDRŽBA MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

01/03/1999 – 30/04/1999 Brno, Česko

POMOCNÁ SÍLA - TESTOVÁNÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ SMT PLUS

01/12/1999 – 10/12/1999 Tišnov, Česko

POMOCNÁ SÍLA - MĚŘENÍ ELEKTROCHEMICKÝCH SENZORŮ ING. ILJA KREJČÍ ENGINEERING

2001 – 2002 Brno, Česko

ELEKTROTECHNIK FLEXTRONICS INTERNATIONAL

2003 – 2004 Brno, Česko

TECHNICKÝ PRACOVNÍK ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY, FEKT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

2005 – 2006

ASISTENT ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY, FEKT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

2007 – 2023 Brno, Česko

ODBORNÝ ASISTENT ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY, FEKT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

2018 – 2020 Zlín, Česko

VĚDECKÝ PRACOVNÍK - EXTERNÍ ZAMĚSTNANEC CENTRUM POLYMERNÍCH SYSTÉMŮ, UTB VE ZLÍNĚ

2021 – 2022 Zlín, Česko

ODBORNÝ ASISTENT ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, FT, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ

2023 – AKTUÁLNÍ Zlín, Česko

ODBORNÝ ASISTENT ÚSTAV AUTOMATIZACE A ŘÍDICÍ TECHNIKY, FAI, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ

● VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

01/09/1992 – 31/08/1995 Česko

BAKALÁŘSKÉ STUDIUM OBORU ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY A SYSTÉMY Vysoké učení technické v Brně

Internetové stránky <https://www.vut.cz/> | **Obor studia** Elektronika a automatizace |

Disertační/diplomová/doktorská práce Vyhodnocování jakosti a spolehlivosti ocelových výrobků

01/09/1995 – 31/08/1998 Brno, Česko

MAGISTRERSKÉ STUDIUM OBORU ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY A SYSTÉMY Vysoké učení technické v Brně

Internetové stránky <https://www.vut.cz/> |

Disertační/diplomová/doktorská práce Počítačový systém pro podporu výuky a zkoušení předmětu Technika PC

01/09/1998 – 30/08/2005 Brno, Česko

DOKTORSKÉ STUDIUM OBORU MIKROELEKTRONIKA A TECHNOLOGIE Vysoké učení technické v Brně

Internetové stránky <https://www.vut.cz/> | **Obor studia** Elektronika a automatizace |

Disertační/diplomová/doktorská práce Optimalizace vlastností tlustovrstvých chemických senzorů

● DALŠÍ INFORMACE

TVŮRČÍ ČINNOST

Užitný vzor: Matyáš, J.; Slobodian, P.; Olejník, R.; Adámek, M.; Daňová, R. 2019. Elektronický monitorovací systém pro průběžnou detekci a signalizaci obsahu amoniaku v plynném prostředí.

Funkční vzorky uvedených v databázi RIV:

- Adámek, M.; Šandera, J.; Doležel, T. 2014. Lepená vrstvená opravárenská šablona pro nanášení pájecí pasty.
- Adámek, M.; Schnederle, P.; Szendiuch, I. 2011. Zařízení pro pájení v ochranné inertní atmosféře.
- Adámek, M.; Macháň, L. 2008. Potenciostat pro detekci olova v pájkách pro elektrotechniku.

Další významné tvůrčí aktivity neuvedené v databázi RIV:

- Adámek, M.; Beneš, D. Přenosné zařízení pro detekci vůně v potravinářství (funkční vzorek)
- Adámek, M.; Prášek, J.; Hubálek, J. Elektrochemický senzor s integrovaným potenciostatem (funkční vzorek)
- Adámek, M.; Šulc, J. Elektrochemické senzorové pole (funkční vzorek)
- Adámek, M.; Cieslar, J. Dálkově řízené pracoviště elektrochemických senzorů. (funkční vzorek)
- Vrba, R., Krejčí, J., Šteffan, P., Adámek, M. Analyzátor pro integrální měření toxicity pesticidů (prototyp)
- Kuchta, R.; Hubálek, J.; Adámek, M. Elektrochemický analyzátor s integrovaným mikropotenciostatem (funkční vzorek)
- Prášek, J.; Adámek, M. Rotující nádoba (funkční vzorek)

PROJEKTY

2011 – 2011

Komplexní inovace systému výuky výrobních technologií mikroelektronických systémů. FRVŠ projekt, reg. č. 1005/2011, řešitel.

2006 – 2006

Virtuální laboratoř sensorové techniky. FRVŠ projekt, reg. č. 3027/2006, řešitel.

2005 – 2005

Podpora multimediální výuky sensorové techniky. FRVŠ projekt, reg. č. 2014/2005, řešitel.

2006 – 2006

- Modernizace laboratorních cvičení z předmětů Mikroelektronika a technologie součástek a Výroba součástek a konstrukčních prvků. FRVŠ projekt, reg. č. 3313/2006, spoluřešitel.

2020 – 2020

Komericializace na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně II, TAČR TP01010006, člen řešitelského kolektivu.

2020 – 2020

Centrum polymerních systémů plus, MŠMT LO1504, člen řešitelského kolektivu.

2019 – 2020

MIOMOVE, MPO CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_107/0012417, člen řešitelského kolektivu.

2018 – 2019

Komericializace na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, TAČR TG03010052, člen řešitelského kolektivu.

2014 – 2016

Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice, FEKT-S-14-2168, člen řešitelského kolektivu.

2011 – 2014

Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů, FEKT-S-11-5/962, člen řešitelského kolektivu.

2010 – 2010

Integrované 3D vícevrstvé struktury a pouzdra s vnořenými (embeded) součástkami, člen řešitelského kolektivu.

2006 – 2008

MIKROSYN Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích, MSM 0021630503, člen řešitelského kolektivu.

2008 – 2008

NANIMEL Miniaturizované inteligentní systémy a nanostrukturované elektrody pro chemické, biologické a farmaceutické aplikace, GAČR GA102/08/1546, člen řešitelského kolektivu.

2006 – 2008

MINASES Mikro a nano sensorové struktury a systémy se zabudovanou inteligencí, GAČR GA 102/06/1624, člen řešitelského kolektivu.

2006 – 2008

Impedimetrické chemické mikrosenzory s nanomechanizovaným povrchem elektrod, GA AV 1QS201710508, člen řešitelského kolektivu.

2005 – 2006

IBIS Inteligentní biosenzorický systém pro detekci pesticidů a herbicidů v životním prostředí, MPO ČR FT-TA/089, člen řešitelského kolektivu.

2004 – 2005

MIKROSYT Výzkum mikroelektronických systémů a technologií, MSM 262200022, člen řešitelského kolektivu.

2004 – 2004

Vývoj mikroelektronických montážních technologií pro 3D obvody a systémy, GAČR 102/04/0590, člen řešitelského kolektivu.

2002 – 2004

ANTOPE Výzkum nových metod přístrojové analýzy toxicity pro integrální měření toxicity v potravinářském průmyslu a jejich ověření na prototypu analyzátoru toxicity pesticidů, MPO ČR FD-K2/53, člen řešitelského kolektivu.

2000 – 2002

INTIM Integrované inteligentní mikrosenzory a mikrosystémy, GAČR 102/00/939, člen řešitelského kolektivu.

2000 – 2001

Vývoj a perspektivy moderních mikroelektronických montážních technologií, GAČR 102/00/0969, člen řešitelského kolektivu.

VÝUKOVÉ AKTIVITY

Vyučující v předmětech:

Výroba součástek a konstrukčních prvků (garant), Elektronické součástky, Elektronické součástky – praktikum, Elektronické součástky pro SEE, Základy experimentu, Fyzika II, Mikroelektronika a technologie součástek, Moderní technologie elektronických obvodů a systémů, Snímače, Mikrosenzory a mikromechanické systémy, Modelování a simulace, Mikroelektronické praktikum, Výroba součástek, Technika PC a komunikace.

Vedoucí závěrečných prací

- více než 30 studentů bakalářského a magisterského studia.

Ing. Martin Adámek, Ph.D.

**Využití termodynamických senzorů a elektronického nosu
v oblasti monitorování a řízení procesů v potravinářství**

The use of thermodynamic sensors and an electronic nose
in the field of monitoring and control of processes in the food industry

Teze habilitační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: 60 výtisků

Sazba: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2024

Pořadí vydání: První

ISBN 978-80-7678-287-7

