



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

AUTOMATICKÉ MONITOROVÁNÍ MNOŽSTVÍ CO₂ V POTRAVINÁŘSKÉM PRŮMYSLU

AUTOMATIC MONITORING OF CO₂ IN THE FOOD INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Mikuš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Martin Mikuš
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Krejčí, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Automatické monitorování množství CO₂ v potravinářském průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při řízení technologických procesů se nelze obejít bez měřicích přístrojů umožňujících získat informace o složení surovin, meziproductů, finálních výrobků a různých provozních médií.

V potravinářském průmyslu se často měření množství unikajícího CO₂ jako produkt přeměny cukrů na alkohol při fermentačních procesech. V těchto případech je vcelku žádoucí kontinuálně sledovat množství unikajícího plynu a včas tak rozpoznat okamžik pro řízené ukončení fermentačního procesu.

Bakalářská práce je zaměřena na vytvoření autonomního systému pro množství CO₂ s bezdrátovým přenosem naměřených hodnot do počítače.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vytvořit systém pro automatické monitorování CO₂ vytvářeného při fermentačním procesu přeměny cukrů na alkohol. Systém bude kontinuálně měřit hladinu plynu a odesílat naměřené hodnoty prostřednictvím wifi sítě na předem definovaný server.

Seznam doporučené literatury:

LIGHT, R. A., Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol, The Journal of Open Source Software, vol. 2, no. 13, May 2017, DOI: 10.21105/joss.00265.

BALÁTEĚ, J.: Technické prostředky automatického řízení. Praha, SNTL 1986.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace systému pro automatické monitorování CO₂ (vznikajícího při fermentačním procesu přeměny cukrů na alkohol) a teploty kvasné směsi. Naměřená data budou bezdrátově přenášena do webové aplikace, ve které budou naměřená data zaznamenána v tabulce. Součástí práce je řešení způsobů a metod měření koncentrace CO₂. Celé měřicí zařízení bude realizováno na ESP32 a napájeno z baterie.

Klíčová slova

Měření koncentrace CO₂, NDIR detektor, Fermentace, ESP32, Bezdrátový přenos

Abstract

The purpose of bachelor thesis is the design and realization of a system for automatic monitoring of CO₂, created during the fermentation process of sugars to alcohol, and of the temperature of the fermenting solution. The measured data will be wirelessly transmitted to a web application, which will save the measured data in to a table. Part of the thesis is a research of ways and methods of measuring CO₂ concentration. The entire measuring device will be implemented on an ESP32 and powered by a battery.

Keywords

Measurement of CO₂, NDIR detector, Fermentation, ESP32, Wireless transmission

Bibliografická citace

MIKUŠ, Martin. *Automatické monitorování množství CO₂ v potravinářském průmyslu*. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140857>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Krejčí.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Automatické monitorování množství CO₂ v potravinářském průmyslu*, vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Martin Mikuš

Brno

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Krejčímu, Ph.D za odborné vedení, konzultace, rady a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a sourozencům, jak za podporu v průběhu práce na bakalářské práci, tak za gramatickou a stylistickou korekturu.

Obsah

1	Úvod	10
2	Formulace cílů	11
3	Zařízení dostupná na trhu	12
4	Fermentace	13
4.1	Chemický proces	13
5	Měření CO₂	15
5.1	Katharometr	16
5.2	Plynová chromatografie	17
5.3	Hmotnostní spektrometrie	19
5.4	Optické senzory	20
5.4.1	Infračervená spektroskopie	20
5.4.2	Vláknová optika	21
5.5	Elektrochemické senzory	22
5.5.1	Potenciometrie	22
5.5.2	Konduktometrie	23
6	Měření teploty	24
6.1	Termistor	24
6.2	Termočlánky	26
7	Návrh zařízení	27
7.1	Mikrokontroler	27
7.2	Senzor CO ₂	29
7.3	Senzor teploty	30
7.4	Napájení	31
7.4.1	Napěťový regulátor	31
7.4.2	Nabíjení a ochrana	32
8	Zapojení	35
9	Programové řešení	37
9.1	Komunikace	37
9.2	Odeslání/uložení dat	38
10	Měření	40
11	Energetická náročnost	42

12 Závěr	43
Literatura	44
Seznam obrázků	47
Seznam příloh	48

1 Úvod

V dnešním, stále se rozvíjejícím, moderním světě je kladen velký důraz na automatizaci výroby zejména v průmyslu. Tento vývoj se neobejde bez implementace počítačů, programů a do budoucna i začlenění umělé inteligence.

Každý proces, který chceme automatizovat je nutné detailně popsat, monitorovat, analyzovat. Cílem těchto postupů je získání velkého množství dat o daném procesu, ze kterých bude možné vyvodit poznatky o jednotlivých krocích procesu. A zároveň stanovit mezní hodnoty, při kterých bude proces probíhat optimálně. Pro získání optimálního průběhu musíme mít také možnost do procesu zasahovat a tím ho řídit. Plnou kontrolou nad procesem zajistíme požadovanou kvalitu výrobku.

V potravinářském průmyslu je sledování a ovlivňování průběhu výroby velmi důležité z důvodu velkých požadavků na kvalitu výrobků. Automatickým řízením procesu výroby jsme schopni eliminovat subjektivní lidský faktor a zajistit kvalitu výrobku.

Při výrobě alkoholických nápojů je důležité sledovat průběh fermentačního procesu z důvodu rozpoznání správného okamžiku pro řízené ukončení tohoto procesu. Například u vína je to důležité z důvodu druhotného kvašení při výrobě sektů. Víno, které chceme použít pro výrobu sektu, musí obsahovat určité množství zbytkového cukru a také nesmí mít velký obsah alkoholu. Z těchto důvodů musí být fermentační proces uměle zastaven.

Cílem práce je sestavit zařízení pro monitorování CO_2 , vznikajícího v průběhu fermentačního procesu, a zajistit bezdrátový přenos dat. Zařízení by mělo být kompaktní, aby ho bylo možné umístit přímo na kvasnou nádobu.

2 Formulace cílů

Bakalářská práce se zabývá návrhem a zhotovením měřicího zařízení pro využití v potravinářském průmyslu. Zařízení by mělo monitorovat koncentraci CO_2 v plynu ucházejícího z kvasné nádoby v průběhu fermentace a tyto data bezdrátově přenášet do webového rozhraní. Výsledky měření by měly být přístupné i z mobilního telefonu a také by mělo být možné měnit délku intervalu mezi měřeními.

Dílčí cíle práce:

- Seznámení s metodami měření koncentrace CO_2
- Návrh měřicího zařízení
- Výběr vhodných komponentů
- Sestavení měřicího zařízení
- Vytvoření řídicího softwaru
- Odkoušení měřicího zařízení se softwarem

3 Zařízení dostupná na trhu

Na trhu lze nalézt jednu firmu, která se zabývá vývojem elektronické kvasné zátky. Jméno této společnosti je PLAATO a jedná se o průkopníka v monitorování průběhu fermentace pro domácí využití. Jejich výrobek na nazývá PLAATO Airlock (obr. 3.1).



Obrázek 3.1: Snímek PLAATO Airlock [5]

Toto měřicí zařízení nepřetržitě monitoruje probíhající fermentaci a data odesílá pomocí WiFi do telefonní aplikace. Jedná se o pokročilou digitální kvasnou zátku, která neustále měří počet unikajících bublin a teplotu okolí. Toto měření je zcela neinvazivní, a proto nemůže dojít k znehodnocení kvasné směsi. Tato digitální kvasná zátka je první pivovarnické zařízení, které se snaží odhadnout obsah alkoholu a čas pro dokončení fermentace [5].

Vlastnosti zařízení: Zařízení má tři LED diody, které znázorňují průtok CO_2 , dále obsahuje digitální tepelný senzor a infračervený senzor. Celé zařízení je napájeno pomocí USB kabelu. Toto zařízení je stále ve vývoji a výrobce se jej snaží stále vylepšovat. V současné době se na internetu objevují negativní recenze, ve kterých si uživatelé stěžují na nepřesnost tohoto zařízení a doporučují používat jiné metody měření prokvašenosti, například měření změny hustoty kvasné směsi.

4 Fermentace

Chemický proces kvašení je nedílnou součástí procesu výroby mnoha různých druhů potravin a nápojů. Je to typ biochemické reakce, která je schopná extrahovat energii ze sacharidů ve sloučenině bez přístupu vzduchu. Další produkty, které vznikají během kvasného procesu jsou plynný vodík, oxid uhličitý, kyselina mléčná a ethanol.

Mnoho organismů využívá kvasný proces ke svému životu (ke své obživě). K tomuto metabolickému procesu dochází, když organismus přemění jakýkoliv sacharid na kyselinu nebo alkohol. Sacharidy mohou být cukry anebo škrob. Kvasinky jsou schopné fermentací provést přeměnu cukrů přímo na alkohol. Také bakterie jsou schopné fermentací provést přeměnu sacharidů na organickou kyselinu zvanou kyselina mléčná.

Kvasný proces má využití jak v potravinářském, tak i v dalších odvětvích průmyslu. Produkty, které jsou vyrobeny za pomoci fermentace jsou: víno, pivo, sýry, jogurty, pečivo, kyselá jídla, které obsahují kyselinu mléčnou např. kysané zelí. Dále se fermentace využívá při čištění odpadních vod a k výrobě průmyslového alkoholu pro bio paliva atd. [4].

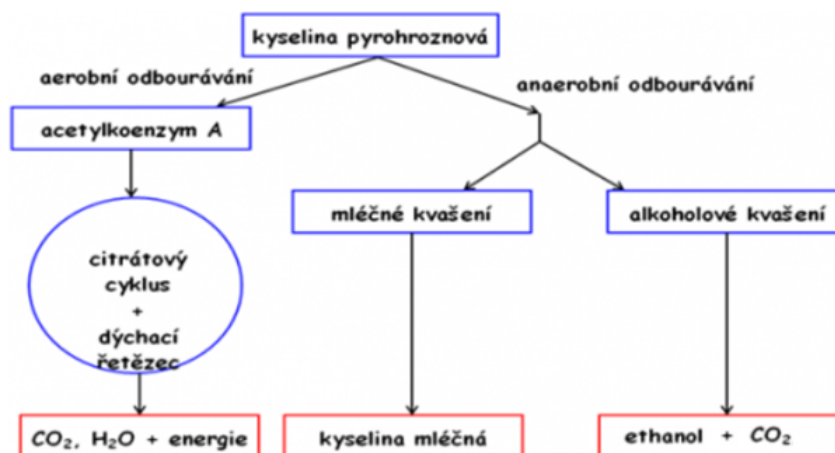
4.1 Chemický proces

Proces fermentace je celkem jednoduchý, i když může vypadat složitě. Během procesu zvaném glykolýza jsou cukry přeměněny v kyselinu pyrohroznovou neboli pyruvát. Tento proces probíhá v cytoplazmě buněk u všech živých organismů za anaerobních podmínek (bez přístupu vzduchu). Schéma procesu glykolýzy je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma glykolýzy [6]

Z kyseliny pyrohroznové pak mohou vznikat dvě řady produktů. Reakce, při kterých budou vznikat, se hlavně liší v tom, v jakém prostředí probíhají. V případě reakce, která probíhá v aerobním prostředí (je tedy k dispozici dostatek kyslíku) dochází ke vzniku acetylkoenzymu A. Pokud reakce probíhá v anaerobním prostředí dochází ke kvašení. Rozlišujeme dva druhy kvašení. Prvním způsobem je kvašení mléčné, ke kterému dochází i ve svalech při nadměrné svalové práci. Takto vznikající laktát narušuje acidobazickou rovnováhu, čímž způsobuje křeče. Druhým způsobem je kvašení alkoholové, resp. ethanolové. Při této reakci dochází ke vzniku ethanolu a oxidu uhličitého. Tento typ kvašení způsobují kvasinky, které zemrou při dosažení asi 16 % obj. alkoholu. Existují také moderní ušlechtilé kvasinky, které jsou schopné dosáhnout až 30 % obj. alkoholu [6].



Obrázek 4.2: Odbourávání pyruvátu [6]

5 Měření CO₂

Stále se rozvíjející potravinářský a zemědělský průmysl vstoupil do éry, která je řízena spotřebiteli, kteří vyžadují kvalitu a bezpečnost potravin, které nakupují. Aby bylo možné analyzovat, navrhnout, vyvíjet a řídit biologické procesy v zemědělském a potravinářském průmyslu, je potřeba shromažďovat a analyzovat data. Tím se potravinářský i zemědělský průmysl stávají závislými na velkém množství senzorů a musejí se spoléhat na technologie a přesnost těchto senzorů. Sensory se například používají pro monitorování parametrů prostředí a pomáhají výrobcům efektivněji programovat a nastavovat jejich zavlažovací systémy nebo pomáhají při určování výskytu škůdců a jejich efektivnějším hubení. Dále pomáhají během skladování produktů, kdy je důležité měřit jejich teplotu, aby nedocházelo k jejich zkažení. Z tohoto důvodu jsou spolehlivé senzory nezbytné pro moderní potravinářský a zemědělský průmysl a také pro rozhodování v reálném čase.

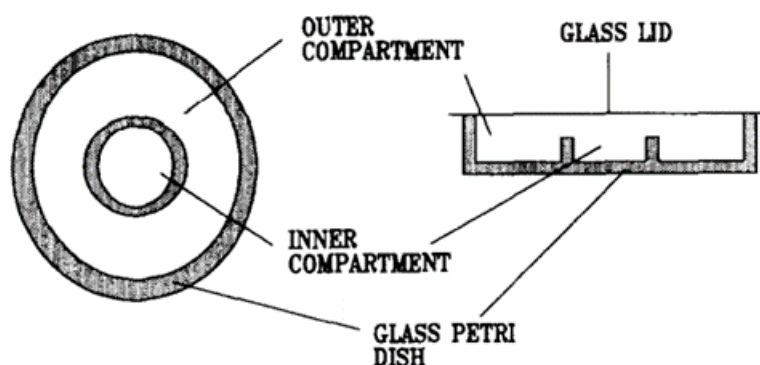
Pro online sledování plynů v potravinářském a zemědělském průmyslu musí být senzory schopné pracovat v extrémních teplotách a tlacích. Prostředí, které obklopuje suroviny nebo také zpracované produkty může být svým složením složité. Výskyt mnoha různých mikroorganismů a dalších biologických činitelů činí snímání parametrů velmi náročným. Procesy zpracování potravin se od sebe výrazně liší, a proto musejí být senzory schopné tuto variabilitu zvládnout.

Sledování koncentrace CO₂ se stává velmi důležitým v řadě průmyslových oblastí, jako je výměna rostlinných plynů, monitorování atmosférických plynů, složení bioplynu, zpracování alkoholu. Balení potravin ve většině případů probíhá v upravených atmosférách, ve kterých se nejčastěji objevuje dusík (N₂), oxid uhličitý (CO₂) a kyslík (O₂). Tato atmosféra je pro každý produkt specifická a její hlavní účel je zabránit mikrobiálnímu znehodnocení.

Detekce CO₂ zahrnuje jak metody kvalitativní, tak kvantitativní. Monitorování CO₂ je důležitým diagnostickým nástrojem při identifikaci výskytu bakterií. Dříve se pro určování výskytu CO₂ používalo několik metod jako Durhamské zkumavky, vytěšňování agarových zátek.[3] Další metoda je spojena s využitím Eldredgeovy trubice, což je skleněné zařízení, které zachycuje CO₂ v hydroxidu barnatém (Ba(OH)₂). Všechny zmíněné metody jsou závislé na výskytu CO₂ v plynném stavu. To však nemusí vždy nastat, protože CO₂ je dobře rozpustný ve vodě.

Zastaralou metodou odhadu výskytu CO₂ je Conwayova mikrodifúzní metoda, při které se CO₂ uvolňuje okyselením vzorku. Existuje řada návrhů tohoto zařízení, ale všechny jsou postavené na jednoduchém základu znázorněném na obrázku 5.1. Ten se skládá z Petriho misky, ve které se nachází skleněný prstenec, který vytváří vnitřní prostor. Celá miska je poté zakryta skleněným víčkem, které je potřené směsí

vaseliny a parafínu, aby bylo zajištěno dobré těsnění. CO_2 uvolněný ze vzorku, který se nachází ve vnějším prostoru se dostane do vnitřního prostoru, kde je absorbován hydroxidem barnatým, který obsahuje acidobazický indikátor thymolftalein. Obsah vnitřního prostoru je následně titrován kyselinou chlorovodíkovou, dokud není indikátor bezbarvý (pH 9,3), přebytek hydroxidu barnatého je neutralizován. Množství CO_2 v kapalném vzorku může být stanoveno přímo. Indikátor fenolftalein je přidán do kapalného vzorku, který je následně titrován roztokem z hydroxidu sodného. Volný CO_2 pak reaguje s hydroxidem sodným a vytváří hydrogenuhličitan sodný. Reakce je ukončena zružověním indikátoru, což odpovídá pH 8,3 [1].



Obrázek 5.1: Conwayova standardní mikrodifuzní cela [1]

Pro odhad koncentrace CO_2 v plynu je možné využít kolorimetrické metody, které nevyžadují žádnou titraci roztoku, který byl použit pro absorpci CO_2 . Barevná intenzita roztoku soli fenolftaleinu sodného klesá s rostoucí koncentrací CO_2 .

Jiné tradiční metody měření CO_2 zahrnují průchod měřeného plynu skrz absorbenty s následným gravimetrickým nebo volumetrickým měřením. Takové metody se využívají, pokud je měřena změna objemu za konstantního tlaku plynného vzorku po odstranění CO_2 , který je absorbován hydroxidem draselným (KOH). Tato změna objemu odpovídá koncentraci CO_2 .

Tyto metody se bohužel nehodí pro nepřetržité monitorování koncentrace CO_2 , protože mohou být použity pouze pro jednorázovou kontrolu a vyžadují obsluhu.

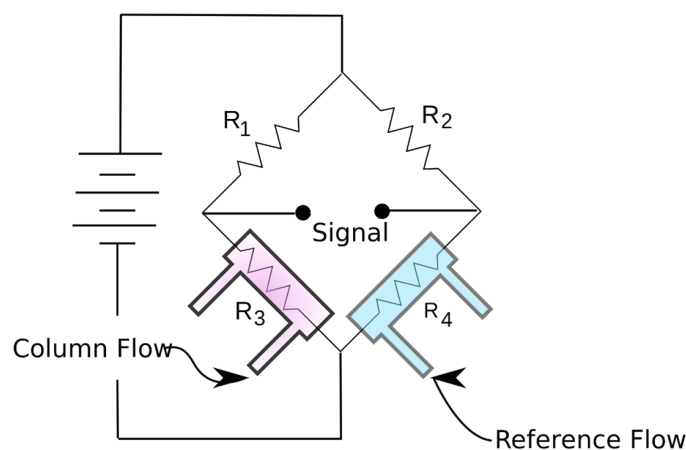
5.1 Katharometr

Katharometr neboli detektor tepelné vodivosti je universální detektor koncentrace, který je často využíván v plynové chromatografii. Chování katharometru odráží tepelnou vodivost plynu, popřípadě směsi, která jím prochází. Využívá citlivosti odporu rezistorů na malé změny teploty, díky čemuž umožňuje detekovat téměř všechny sloučeniny, které mají odlišnou tepelnou vodivost, než je tepelná vodivost referenčního plynu.

Katharometr se skládá ze dvou trubic a čtyř identických rezistorů. Tyto rezistory tvoří ramena Wheatstoneova můstku (obr. 5.2). Dva z těchto čtyř rezistorů jsou v

trubicích, ve kterých proudí plyn. Jeden rezistor je vystaven proudu referenčního plynu a druhý je vystaven proudu měřeného plynu. Pokud oběma trubicemi prochází totožný plyn, tak měřené napětí je nulové. Za těchto podmínek je můstek v elektrické rovnováze, protože všechny rezistory mají stejnou teplotu a tím pádem stejný odpor [7].

Pokud trubicemi prochází dva rozdílné plyny například vzduch (jako referenční plyn) a vzduch s vyšší koncentrací CO_2 (jako měřený plyn), pak rezistor přes který bude proudit vzduch, ztratí více tepla, než rezistor přes který proudí vzduch s větší koncentrací CO_2 , protože vzduch má větší tepelnou vodivost než vzduch s vyšší koncentrací CO_2 . Tato změna teploty ovlivní velikost odporu, změna rezistivity vychýlí Wheatstoneův můstek z rovnováhy a na můstku vznikne měřitelné napětí. Velikost naměřeného napětí odpovídá rozdílu mezi teplotními vodivostmi plynů a v tomto případě také počtu molekul CO_2 [1].



Obrázek 5.2: Schématické znázornění Wheatstoneova můstku [7]

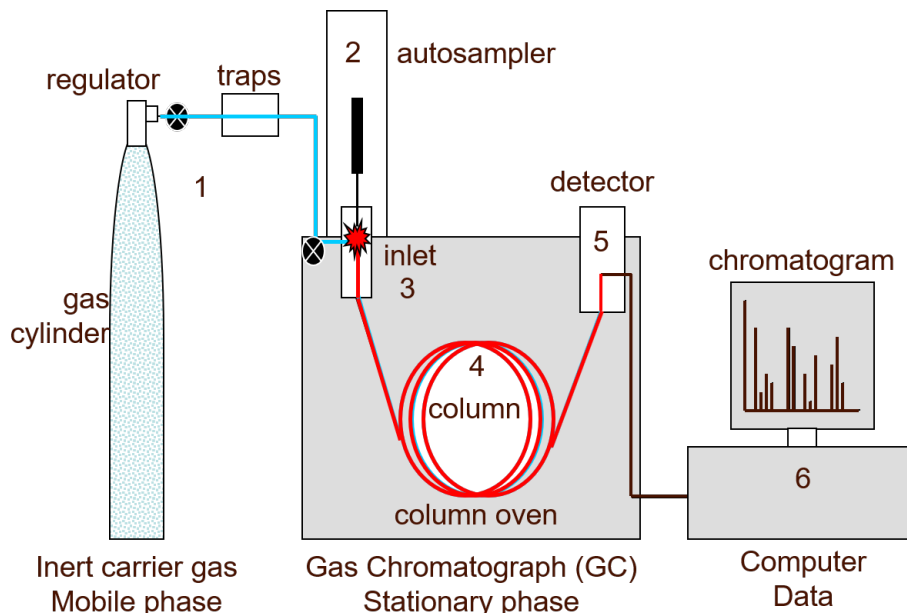
Měření plynů pomocí katharometru není specifické například pro CO_2 . Aby byl katharometr využitelný při měření plynu uvolňujícího se při kvašení, musel by být plyn nejprve oddělen na jednotlivé plyny například pomocí plynové chromatografie.

5.2 Plynová chromatografie

Plynová chromatografie je typ fyzikálně-chemické separační metody, která je také někdy známa jako chromatografie v parní fázi nebo rozdělovací chromatografie plyn-kapalina, při které se od sebe oddělují složky obsažené ve směsi plynu.

Plynová chromatografie je proces, při kterém dochází k separování jednotlivých složek směsi pomocí vstřikování plynného nebo kapalného vzorku do mobilní fáze. Spolu s pohybující se mobilní fází je unášen vzorek, který prochází stacionární fází. Pohybující se fáze je většinou tvořena inertním (nereaktivním) plynem, jako například hélium, argon, dusík nebo vodík. Stacionární fáze je tvořena mikroskopickou vrstvou viskózní kapaliny na povrchu zrnčeka inertního pevného nosiče umístěného

ve skleněné nebo kovové trubici nazývané kolona. Tato trubice, kterou prochází plyn je umístěna v peci, kde může být kontrolována teplota, aby bylo zajištěno, že vzorek zůstane v plynné fázi [8].



Obrázek 5.3: Zjednodušené znázornění plynové chromatografie [9]

Poté co je vzorek zaveden do proudu nosného plynu, dochází k interakci složek vzorku se stacionární fází. Různé složky vzorku se pohybují skrz stacionární fází různě rychle. Proto se na konec kolony dostávají dříve složky, které jsou méně zadržované. Jak rychle jednotlivé složky projdou přes stacionární fází odpovídá jejich distribuční konstantě K_D ,

$$K_D = \frac{C_s}{C_m} \quad (5.1)$$

což je poměr rovnovážných koncentrací měřené látky ve stacionární a mobilní fází za předpokladu, že tato látka je v obou fázích přítomna ve stejné molekulové formě. Čím nižší je K_D , tím nižší je rozpustnost složky ve stacionární fází a tím rychleji projde složka kolonou. Pouze složky, které mají jinou hodnotu K_D mohou být separovány. Separované složky poté pokračují do detektoru. Detektory, které se používají při chromatografii jsou katharometry, detektory elektronového záchytu a detektory plamenoionizační. Signál z detektorů zpracovává chromatograf, který zakresluje chromatografickou křivku. Z křivky se pomocí chromatogramů (chromatografických píků) a znalosti retenčního času, tedy doby, která uběhne od nástřiku vzorku do dosažení maxima křivky, dají určit jednotlivé složky. Množství jednotlivých složek ve vzorku, se určuje pomocí vyhodnocení ploch píků jednotlivých složek [8].

Bohužel plynová chromatografie je závislá na separaci jednotlivých složek, a proto

se nehodí na nepřetržité měření. Přístroje, které tuto separaci zajišťují jsou velmi náročné na prostor.

5.3 Hmotnostní spektrometrie

Hmotnostní spektrometrie je metoda analytické chemie, která pracuje s měřením poměru:

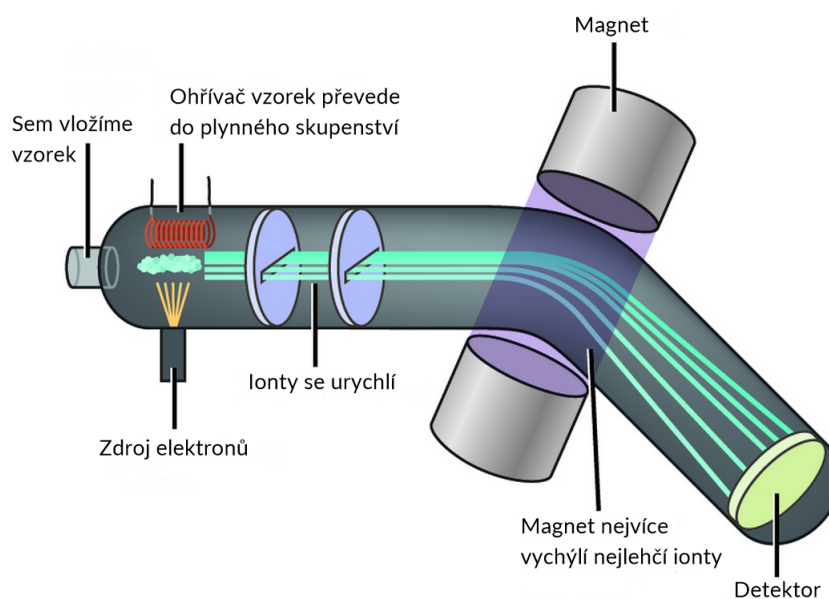
$$\frac{m}{Q} \tag{5.2}$$

kde m je hmotnost a Q je náboj fragmentu. Používá se pro určení hmotnosti částic nebo stanovení elementárního složení vzorku. Princip hmotnostní spektrometrie je založen na ionizaci chemických sloučenin, při které vznikají nabitě molekuly nebo části molekul.

Vzorek je ionizován například bombardováním paprskem elektronů. Vzniklé ionty jsou následně urychlovány elektrickým polem skrz řadu štěrbin, aby došlo ke vzniku iontového paprsku. Tento paprsek je poté zakřiven pomocí magnetického pole. Jednotlivé ionty s různými poměry hmotnosti k náboji mají odlišné poloměry zakřivení vycházející z:

$$\frac{m}{Q} = \frac{H^2 r^2}{2U} \tag{5.3}$$

kde H je intenzita magnetického pole, r je poloměr zakřivení a U je napětí použité na urychlení iontů. Pomocí nepřetržitého monitorování urychlovacího napětí nebo magnetického pole mohou být na detektor usměrněny ionty s odlišnými poměry hmotnosti k náboji a následně změřeny [1].



Obrázek 5.4: Schéma hmotnostního spektrometru [10]

Bohužel hmotnostní spektrometrie nemůže být vždy využita k určení všech složek vzorku a vzorek musí být před vstřikem do hmotnostního spektrometru separován například plynovou chromatografií. Některé složky mohou mít podobný poměr hmotnosti k náboji a může docházet k překrývání, které zásadně snižuje přesnost kvantifikace jednotlivých složek. I přes tento problém však může být plyn unikající při kvasném procesu měřen pomocí hmotnostního spektrometru, protože se v něm nevyskytují žádné složky s podobnými poměry hmotnosti k náboji. Poměr hmotnosti k náboji pro CO_2 se rovná 44 Čt (Thomson).

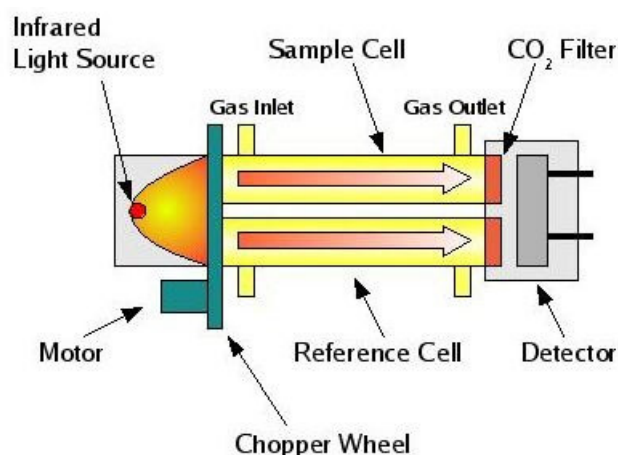
Pro naše použití v jednotlivých kvasných nádobách jsou hmotnostní spektrometry nepoužitelné, protože jsou neúnosně drahé.

5.4 Optické senzory

5.4.1 Infračervená spektroskopie

Infračervená spektroskopie je měření interakce infračerveného záření se vzorkem. Nejčastěji se využívá absorpce částí infračerveného spektra vzorkem. Infračervené detektory jsou velmi citlivé, mají rychlou odezvu a jsou spolehlivé, ale mohou měřit CO_2 pouze v plynu, ne v kapalině. Komerčně nejdostupnější detektory jsou nedisperzní infračervené detektory, tyto detektory se používají, pokud chceme v plynu sledovat pouze jednu složku. Jejich hlavní výhodou oproti analytickým přístrojům je cena, velikost, jednoduchost ovládání a také možnost nepřetržitého měření.

Nedisperzní infračervené detektory (NDIR) jsou velmi jednoduché. Pracují na principu absorpce energie v infračerveném spektru. Všechny plyny absorbují energii infračerveného záření, která odpovídá jejich vlastní kvantové vibrační energii. Oxid uhličitý pohlcuje infračervené záření o vlnových délkách 2,7; 4,3 a 15 μm [2]. Typický nedisperzní infračervený detektor se skládá ze dvou identických trubic, přes které prochází infračervené záření. Jedna z těchto trubic je referenční a je naplněna inertním plynem jako je například dusík. Druhou trubicí prochází měřený plyn. Filtry a monochromátory jsou použity, aby byl získán monochromatický paprsek ze zdroje infračerveného záření, který má určitý rozsah vlnových délek důležitých pro složku, kterou chceme v plynu sledovat. Tento paprsek prochází oběma trubicemi a dopadá na detektor. Plyn v měřicí trubicí pohltí část infračerveného spektra. Detektor poté měří rozdíl mezi signály z referenční trubice a měřené trubice. Tento rozdíl je proporcionální k množství a koncentraci plynu. Jednotkou koncentrace (složky v) plynu je ppm (parts per million) nebo ppb (parts per billion) neboli částic na milion nebo částic na miliardu.



Obrázek 5.5: Schématické znázornění nedisperzního infračerveného detektoru [11]

Nevýhodou nedisperzních infračervených detektorů může být, že voda silně pohlcuje infračervené spektrum, a proto výskyt vodní páry v měřeném plynu může zkreslovat výsledky.

5.4.2 Vlákňová optika

Vlákňová optika je další optická metoda pro měření koncentrace CO_2 . Tyto typy snímačů s optickým vláknem se nazývají optody. Vlákňové optické senzory mají na konci optického vlákna chemickou snímací vrstvu, která mění optické vlastnosti v reakci na CO_2 .

Senzory CO_2 na bázi optických vláken jsou vyráběny z materiálů, které vykazují změny absorpce nebo odrazivosti při vystavení CO_2 . Byly použity snímací prvky jako jsou organická barviva indikující pH a organokovové komplexy nanesené na tenkých filmech z polymerů, které jsou propustné pro plyny. Po vystavení snímacího prvku, dochází ke změně absorpce a odrazivosti filmu. Poté je snímaný bod osvětlen červenou světelnou diodou, která emituje světlo o určité vlnové délce, která odpovídá základní formě činidla. Světlo, které prosvítává filmem generuje teplo v místě dopadu, což má za následek expanzi bodu a následné namáhání polymerního filmu. To vytváří náboj na filmu a tento náboj koresponduje s koncentrací plynného CO_2 [2].

Výhodou plynových senzorů s optickým vláknem je, že jsou chemicky inertní a nejsou citlivé na přítomnost jiných plynů. Velkou nevýhodou však je, že tyto senzory využívají čočky, na kterých se v průběhu času může objevit povlak prachu, což má za následek rušení přenosu světla. Optický senzor proto potřebuje časté čištění, aby si zachoval svoji přesnost.

5.5 Elektrochemické senzory

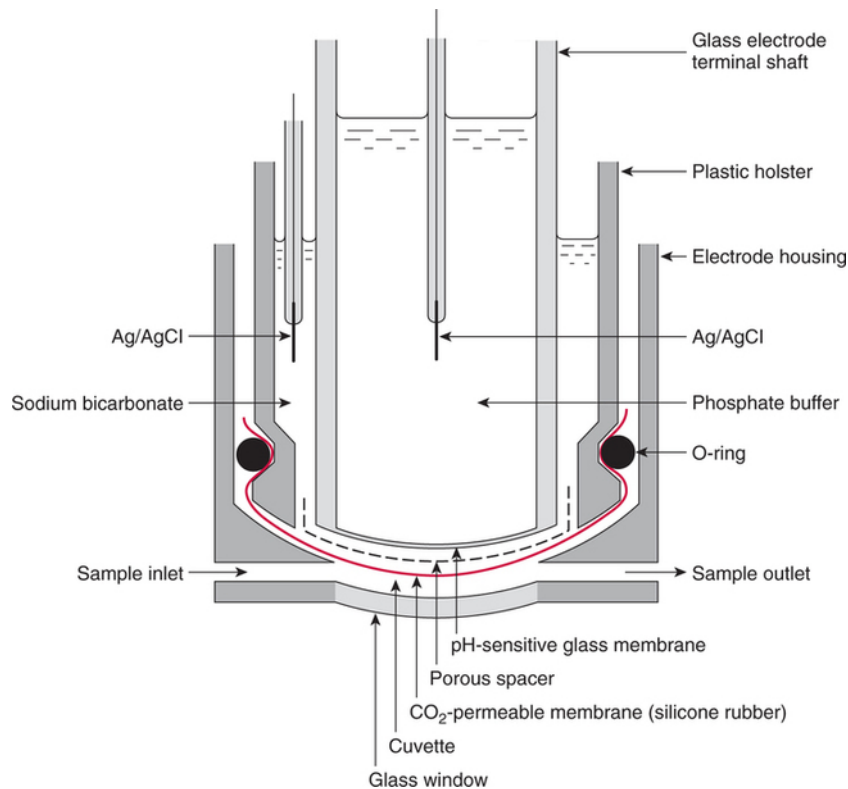
Pro potřeby vesmírného výzkumu, leteckého průmyslu a medicíny jsou kladeny velké nároky na velikost senzorů. Sensory musí být co nejkompaktnější. Proto se v poslední době provádí značný výzkum využívající nanotechnologie a mikroelektroniku pro zvýšení výkonu sensorových zařízení. Všechny chemické senzory závisí na interakcích na atomové nebo molekulární úrovni. Jak nano, tak MEMS (mikroelektromechanické systémy) technologie přinášejí způsoby, jak měřit proměnné, které byly donedávna příliš složité a drahé na to, aby je bylo možné měřit.

Elektrochemické senzory a senzory s tuhým elektrolytem jsou senzory, které využívají nano a MEMS technologie pro monitorování CO_2 . Tyto senzory můžeme rozdělit podle metody měření na potenciometrické, konduktometrické a amperometrické. V potenciometrických senzorech je měřeným signálem elektromotorická síla. V případě konduktometrických senzorů je analyzován graf proudu a napětí. A v případě amperometrických senzorů je měřen elektrický proud. Sensory s tuhými elektrolyty mají mnoho výhod jako je například malé rozměry, velká přesnost při monitorování plynů o malých koncentracích, schopnost pracovat za vysoké teploty a v korozivním prostředí. Nevýhodou je, že senzory s časem ztrácejí přesnost [2].

5.5.1 Potenciometrie

Iontově selektivní elektrody mohou být použity pro odhad široké škály sloučenin, včetně plynů, jako například amoniaku, O_2 a CO_2 . Ke stanovení koncentrace CO_2 pomocí iontově selektivních potenciometrických elektrod se využívá například Severinghausova elektroda (Obr. 5.6), která se skládá ze skleněné elektrody, která je senzitivní na pH. Tato elektroda je obklopena roztokem hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO_3). Kvasná směs a roztok hydrogenuhličitanu sodného jsou uvnitř Severinghausovy elektrody odděleny pomocí membrány, která je prostupná pro molekuly CO_2 , ale neprostupná pro vodu. Oxid uhličitý prostupuje touto membránou, dokud nedojde k rovnovážnému stavu mezi měřenou tekutinou a roztokem. Toto vede ke změně pH roztoku, který je monitorován pH elektrodou, změna pH roztoku hydrogenuhličitanu sodného je přímo úměrná koncentraci CO_2 ve vzorku [1].

Potenciometrická Severinghausova elektroda má pro určení koncentrace CO_2 velmi dlouhou dobu odezvy kvůli tomu, že musí dojít k rovnováze koncentrace CO_2 v roztoku a ve vzorku. Dalším problémem je, že Severinghausova elektroda musí být umístěna přímo v kvasném mediu, a proto se tato metoda měření koncentrace CO_2 nazývá invazivní metoda, která může způsobovat řadu problémů. Může dojít ke kontaminaci kvasné směsi a samotné zařízení musí být dostatečně robustní, aby mohlo být sterilizováno.



Obrázek 5.6: Schématické znázornění Severinghausovy elektrody [12]

5.5.2 Konduktometrie

Konduktometrické senzory se také využívají pro určování koncentrace CO_2 v plynu. V těchto senzorech dochází k průchodu CO_2 skrz plynem průchozí membránu, která je hydrofobní, do tenké vrstvy čisté vody. Na jedné straně tenké vodní vrstvy je porézní síto, které odděluje vodu od iontoměničové kolony, která nepřetržitě odstraňuje iontové látky z vodní vrstvy. Elektrody umístěné ve vodní vrstvě kontinuálně měří její vodivost. Difúzí CO_2 do vodní vrstvy a odstraňováním iontových částic iontovým měničem dochází k vytvoření ustáleného koncentračního gradientu CO_2 , který je proporcionalní ke koncentraci CO_2 v plynu [13].

6 Měření teploty

Typy teplotních senzorů se mohou vzájemně hodně lišit. Od neelektrických termostatů, které ovládají například vytápění hlídáním maximální a minimální teploty prostředí, až po vysoce citlivé polovodičové typy.

Teplotní senzory měří množství tepelné energie, která je vygenerována objektem. To nám umožňuje sledovat jakoukoliv změnu této teploty a vyjádřit ji buď analogovým nebo digitálním výstupem. K dispozici je velké množství typů senzorů teploty, které mají různé vlastnosti v závislosti na jejich aplikaci. Teplotní senzory můžeme rozdělit do dvou skupin:

- Kontaktní tepelné senzory – tyto senzory potřebují fyzický kontakt s předmětem, který měří a používají teplotní vodivost k monitorování změn teploty.
- Bezkontaktní telené senzory – tyto senzory používají konvekci a záření, například ve formě infračerveného záření, ke sledování změn teploty.

Tyto skupiny pak můžeme dále dělit na tři další podskupiny:

- Elektro-mechanické
- Odporové
- Elektronické

6.1 Termistor

Termistor je další typ senzoru, který se používá pro měření teploty. Termistor je speciální typ rezistoru, kterému se se změnou teploty mění jeho odpor.

Termistory se běžně vyrábějí z keramických polovodičových materiálů jako jsou oxidy niklu, manganu, titanu nebo z kobaltu, který je potaženým sklem. Tyto polovodičové materiály jsou formovány do malých lisovaných disků nebo kuliček, které jsou následně hermeticky utěsněny, aby poskytovali rychlou odezvu na jakoukoliv změnu teploty [15].

Termistory z polovodičových materiálů můžeme rozdělit do dvou typů:

- Pozistor (PTC) – termistor s pozitivní teplotní závislostí. Nejčastěji se vyrábí z titaničitanu barnatého. Jeho odpor s rostoucí teplotou velmi strmě roste. Díky této vlastnosti se také dá použít jako vratná tepelná pojistka. Bohužel jako teploměr má velice malý rozsah.

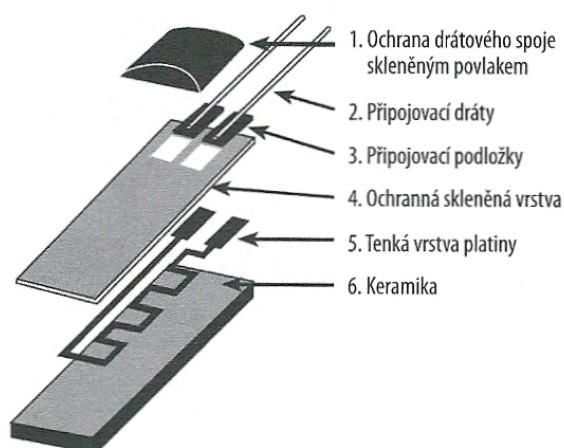
- Negastor (NTC) – termistor s negativní teplotní závislostí. Jeho odpor s rostoucí teplotou klesá. Může být velice citlivý až na sta tisíce stupně. Jeho teplotní rozsah se nejčastěji pohybuje od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Teplotní závislost termistorů však není lineární. Termistor je pasivní odporová součástka, to znamená, že přes něj musí procházet proud, aby se na něm vytvořilo měřitelné napětí.

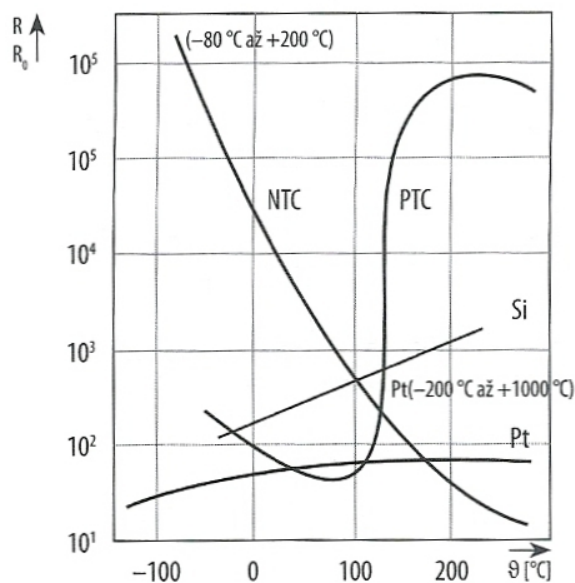


Obrázek 6.1: Smíček různých typů termistorů [15]

Odporové teplotní detektory mohou být také vyrobeny z kovů. Nejčastěji se vyrábí z vysoce čistých kovů jako například platiny, niklu nebo mědi. Provedení může být z velmi tenkého drátku, který je namotán do cívky okolo keramického nebo skleněného jádra, nebo v současnosti více používané vrstevné provedení. Odporové teplotní detektory mají také pozitivní teplotní závislost jako pozistor, ale hlavním rozdílem mezi nimi je, že závislost odporového teploměru z čistého kovu je extrémně lineární. Bohužel jejich změna rezistivity je velmi malá, přibližně $0,5\ \Omega/1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich teplotní rozsah se pohybuje od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16, 17].



Obrázek 6.2: Schéma platinového teplotního čidla [17]

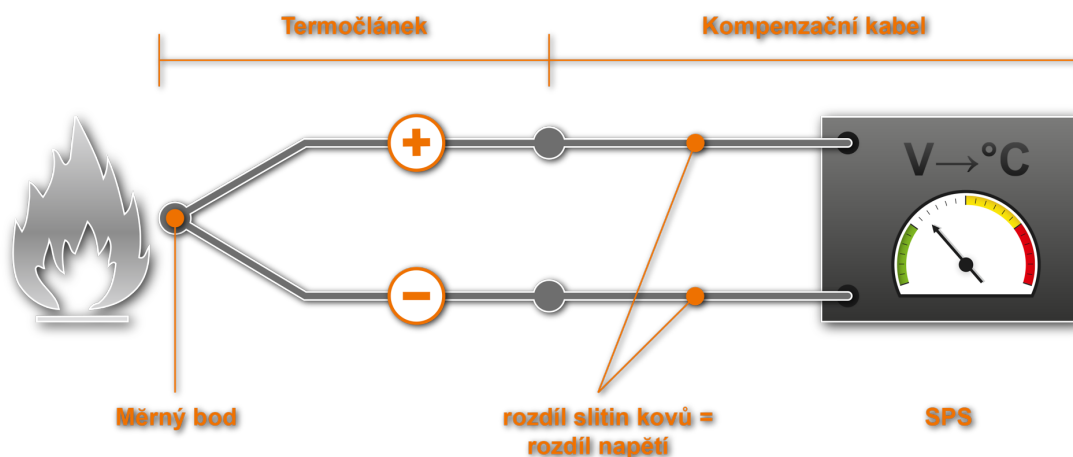


Obrázek 6.3: Změna rezistivity termistorů podle materiálů [17]

6.2 Termočlánky

Termočlánky jsou kontaktní tepelná čidla, která využívají principu termoelektrického jevu. V dnešní době jde o nejpoužívanější tepelné senzory hlavně kvůli jejich jednoduchosti, velikosti, a hlavně kvůli jejich teplotnímu rozsahu. Termočlánky mají nejširší teplotní rozsah od -200 °C do $+2000\text{ °C}$ [18].

Termočlánek se skládá ze dvou vodičů různých kovů, které jsou na jednom konci spojeny do měřícího bodu a na druhém dochází ke vzniku termoelektrického napětí, které je měřeno. Toto napětí je závislé jen na teplotě v místě spoje vodičů a na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Nejpoužívanější materiály jsou železo, platina, rhodium, nikl, chrom a wolfram.



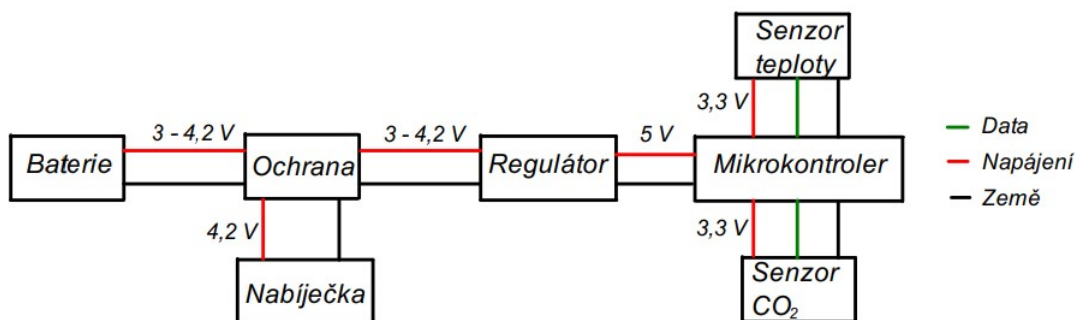
Obrázek 6.4: Schématické zapojení termočlánku [19]

7 Návrh zařízení

Úkolem měřicího zařízení je monitorovat koncentraci CO₂ v plynu, který uniká při fermentaci. Dalším jeho úkolem je měřit teplotu kvasné směsi. Tato získaná data pak bezdrátově přesést do webové aplikace, která zajistí jejich zapis do tabulky.

Celé zařízení by mělo být napájeno z baterií. Při intervalu 10 minut mezi jednotlivými měřeními by zařízení mělo být funkční po dobu celého fermentačního procesu (přibližně 14 dnů). Při napájení z baterií je potřeba baterie ochránit před podbitím, přebitím, nadproudem a případným zkratem. V případě nedostupnosti internetu by naměřená, nedešlaná data neměla být ztracena, ale uložena na interní uložení. Po opětovném připojení k internetu by měla být tato data odeslána k zapisu.

Webová aplikace by měla zajistit zápis naměřených dat do tabulky a také by měla měřicímu zařízení vrátit nastavenou délku intervalu mezi měřeními.



Obrázek 7.1: Blokové schéma navržené elektroniky

7.1 Mikrokontroler

Mozkem celého měřicího zařízení bude mikrokontroler ESP32, který je vytvořen a vyvíjen společností Espressif Systems a vyroben společností TSMC. ESP32 je cenově dostupný, nízkoenergetický mikrokontroler, který může být poháněn buď mikroprocesorem Tensilica Xtensa LX6 ve dvoujádrových i jednojádrových variantách, dvoujádrovým mikroprocesorem Tensilica Xtensa LX7 nebo jednojádrovým Mikroprocesorem RISC-V. Jedná se o nástupce mikrokontroleru ESP8266. Oproti tomuto mikrokontroleru má ESP32 již integrovanou 2,4GHz Wi-Fi a dual-mode Bluetooth. To je velkou výhodou, protože umožňuje se k modulu vzdáleně připojit nebo odesílat data do počítače nebo na webové rozhraní.

Vyrábí se různé desky, které tento mikrokontroler obsahují. Tyto desky se od sebe liší množstvím výstupních pinů, předinstalovaných periférií a samozřejmě cenou. Mezi předinstalované periferie patří například OLED displej, slot pro SD kartu pro

ukládání dat, bateriový modul s napěťovým převodníkem a nabíječkou. Tyto desky se podobají výukové a vývojové platformě Arduino, která sklídila velké úspěchy mezi studenty i mezi širší veřejností pro domácí aplikace. Ale oproti Arduino desky, které obsahují ESP32 jsou výrazně levnější a mají vyšší výkon. Proto lze tyto desky využít i pro náročnější operace jako například komprese hlasového záznamu, dekodování MP3 a rozpoznávání obrazu [20].

Pro bakalářskou práci byla vybrána deska ESP32 Development Board 38 pin (obr. 7.2). Důvodem výběru právě této desky byla hlavně dostupnost, již předinstalovaná WiFi a nízká cena. Tato deska obsahuje 38 vstupně-výstupních pinů a čip ESP32-D0WDQ6 s dvoujádrovým procesorem Tensilica LX6, jehož jádra jsou ovládána individuálně a jejich frekvence je nastavitelná od 80 MHz do 240 MHz. Díky své nízké energetické náročnosti dovede provádět ADC (analog to digital) převody, výpočty a hlídání prahových hodnot, a to i v režimu hlubokého spánku, kde spotřebovává pouhých 5 μ A. Interní paměť mikrokontroleru je rozdělena na ROM, která má velikost 448 KiB a slouží ke spouštění a pro důležité funkce, a na SRAM o velikosti 520 KiB pro data a instrukce. Mikrokontroler také obsahuje bezpečnostní prvky jako je zašifrování flash paměti, secure boot, také jsou podporovány všechny standardní bezpečnostní funkce IEEE 802.11, včetně WFA, WPA/WPA2 a WAPI. Dále obsahuje 16 ADC převodníků, 2 DAC (digital to analog) převodníků, 10 kapacitně dotykových snímačů, 2 UARTy, 2 SPI, I²C a I²S.

Tato deska může být napájena buď z 5V pinu nebo 3V3 pinu. Když budeme desku napájet z 5V pinu můžeme si dovolit trochu vyšší napětí, protože je na pin připojen stabilizátor, který převádí vstupní napětí na napětí 3,3 V, které následně napájí mikrokontroler. Pokud chceme desku napájet z pinu 3V3 musíme si dát pozor, aby napětí nepřesáhlo limity mikrokontroleru (2,6 V – 3,6 V). Další problém, který může nastat je, když budeme desku napájet například 2,8 V, tak toto napětí může být nízké pro připojené periferie a periferie nebudou správně fungovat.



Obrázek 7.2: Snímek vývojové desky s ESP32 [21]

7.2 Senzor CO₂

Pro měření koncentrace CO₂ v plynu byl vybrán senzorový modul SCD30 od společnosti Sensirion (obr. 7.3) a to hlavně z důvodu jeho malých rozměrů. Jedná se o optický senzor s využitím infračerveného záření, jehož princip fungování byl popsán výše. Technologie CMOSens® pro NDIR detekci umožňuje měření CO₂ s největší přesností za konkurenceschopnou cenu. Součástí tohoto senzorového modulu je i senzor vlhkosti a teploty také od společnosti Sensirion. Celý modul je plně kalibrovaný a linearizovaný.

Modul SCD30 může komunikovat s řídicí elektronikou třemi způsoby, pomocí PWM, UART a I²C. Rozsah měření koncentrace CO₂ při využití komunikace přes UART nebo I²C by měl být přibližně od 0 ppm do 40 000 ppm. Ale jeho nejpřesnější oblast se pohybuje od 400 ppm do 10 000 ppm. V této oblasti výrobce uvádí přesnost $\pm (30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ naměřené hodnoty})$. Při komunikaci pomocí PWM je rozsah měření od 0 ppm pouze do 5 000 ppm. Teplotní stabilita měření CO₂ je $\pm 2,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Pracovní podmínky senzoru se pohybují od 0 °C do 50 °C a vlhkost se musí pohybovat od 0 % do 95 %. Modul může být napájen v rozmezí od 3,3 V do 5,5 V. Jeho maximální odběr proudu v průběhu měření je 75 mA, ale jeho průměrný odběr je 19 mA, protože mezi měřeními je přibližně dvou vteřinová pauza. Celkový rozměr modulu SCD30 je 35x23x7 mm [22].

Modul má sedm vývodních pinů, které jsou:

- VDD – přivádí se napájení 3,3 V – 5,5 V
- GND – uzemnění
- TX/SCL – Modbus: přenosová linka nebo I²C sériové hodiny
- RX/SDA – Modbus: přijímací linka nebo I²C sériová data
- RDY – Pin data připravena: když jsou data připravena je na logické 1.
- PWM – PWM výstup koncentrace CO₂ z modulu
- SEL – Pin výběru komunikace: pokud chceme zvolit UART, připojíme pin na VDD, ale nesmíme přesáhnou 4 V. Pokud chceme zvolit I²C, tak buď pin připojíme k zemi nebo ho necháme volný.



Obrázek 7.3: Snímek senzorového modulu SCD30 [23]

7.3 Senzor teploty

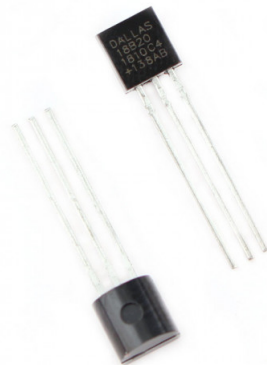
Pro měření teploty kvasu v nádobě byl vybrán digitální teplotní senzor DS18B20 od společnosti Dallas Semiconductor (obr. 7.4), Tento senzor pracuje na principu negastoru, o kterém již byla řeč výše a komunikuje s řídicí elektronikou pomocí protokolu 1-Wire. Jeho teplotní rozsah je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ale jeho nejpřesnější oblast je od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde se jeho přesnost pohybuje $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velikost dat, které od senzoru dostává řídicí elektronika se pohybuje od 9 do 12 bitů. Tato velikost odpovídá nastavenému teplotnímu rozlišení. Při 9 bitech je rozlišení $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro 10 bitů je $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro 11 bitů je $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro 12 bitů je $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výchozí rozlišení senzoru je 12 bitů. Nevýhodou vyššího rozlišení je delší doba převodu analogového výstupu na digitální. Nejdelší doba převodu teploty na 12 bitový digitální výstup se pohybuje okolo 400 ms. Senzor může být napájet v rozmezí 2,5 V až 5,5 V. Jeho maximální odběr proudu je 1,5 mA [25].

Senzor má vyvedené tři piny:

- VDD – přivádí se napětí 2,5 V až 5,5 V
- DQ – vstup a výstup dat
- GND – uzemnění

Senzor může být napájet dvěma způsoby:

- Napájení přes VDD – na pin VDD přivedeme napětí v podporovaném rozmezí, pin GND uzemníme a pin DQ, přes který probíhá komunikace připojíme na vstup řídicí elektroniky a také ho připojíme přes odpor $4,7\text{ k}\Omega$ na napájecí napětí.
- Napájení přes DQ (parazitní napájení) – pin VDD a GND uzemníme a pin DQ připojíme k řídicí elektronice. Dochází k nabití interního kondenzátoru, který následně poskytuje energii, když si vyžádáme teplotu.



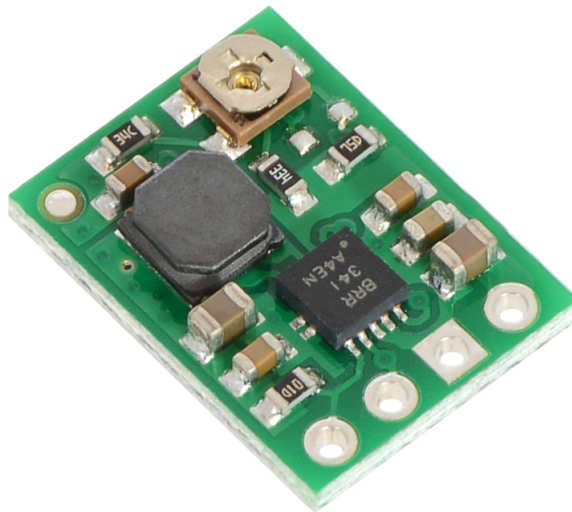
Obrázek 7.4: Snímek tepelného čidla DS18B20 [26]

7.4 Napájení

Pro napájení celého měřicího zařízení byly zvoleny dvě dobíjecí lithium-iontové baterie 18650, které jsou zapojeny paralelně. Tyto bateriové články jsou velmi populární a staly se novým standardem pro vyměnitelné a dobíjecí baterie. Hojně se používají v RC modelech a také v akumulátorovém nářadí. Při průzkumu bylo zjištěno, že se tyto baterie vyrábějí v mnoha různých kapacitách od 1000 mAh až do 3500 mAh. V našem případě by měly být dostačující baterie o kapacitě 2000 mAh. Jejich provozní napětí se pohybuje od 3 V (vybitá) do 4,2 V (plně nabitá). Jejich velikost je 65 mm na délku a 18 mm v průměru.

7.4.1 Napěťový regulátor

Protože se napětí baterie pohybuje v určitém rozmezí, je zapotřebí toto napětí stabilizovat a převést na napětí takové, kterým budeme moct napájet ESP32 vývojovou desku. Napětí baterie přesahuje horní hranici napájení na pin 3V3 u desky, a proto musí být napětí zvýšeno pomocí step up regulátoru na 5 V nebo něco málo nad. Pro zvýšení napětí byl vybrán nastavitelný step up napěťový regulátor U1V11A od společnosti Polotu Robotics & Electronics (obr. 7.5).



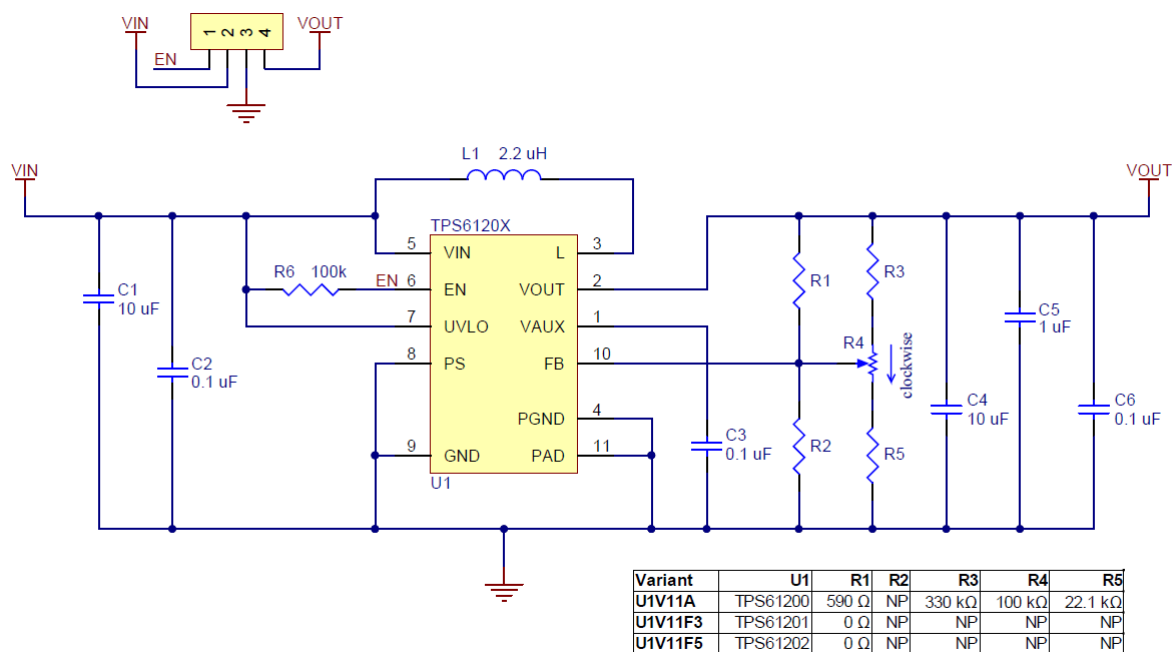
Obrázek 7.5: Snímek napěťového regulátoru U1V11A [27]

U tohoto step up regulátoru může být nastaveno výstupní napětí od 2 V do 5,25 V a jeho vstupní napětí se může pohybovat od 0,5 V do 5,5 V. Výstupní napětí může být nastaveno pomocí multimetru a lehké zátěže (např. 1 k Ω rezistor), která je připojena k regulátoru. Otáčením potenciometru ve směru hodinových ručiček zvyšujeme jeho výstupní napětí. Tento regulátor se také umí přepnout do režimu lineární down regulace, když vstupní napětí překročí výstupní. Maximální proud, který může regulátorem procházet je 1,2 A. Účinnost regulátoru, když je v režimu step up regulace se pohybuje od 70% do 90%. Tento regulátor má také možnost být vypnut a na rozdíl od většiny step up měničů je zátěž opravdu odpojena. U

regulátoru také nedochází k velkým ztrátám, pokud z němu není připojena zátěž. Rozměry regulátoru jsou 15x12 mm [27].

Modul má čtyři vyvedené piny:

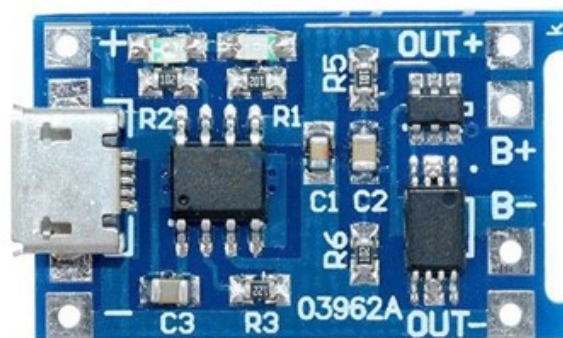
- VIN – přivádíme vstupní napětí od 0,5 až 5,5 V
- GND – uzemnění
- VOUT – výstupní napětí od 2 V do 5,25 V
- SHDN – vypínání/zapínání regulátoru. Pokud tuto možnost nechceme používat, můžeme pin nechat nepřipojen nebo ho můžeme připojit k VIN.



Obrázek 7.6: Schéma zapojení napětového regulátoru U1V11A [27]

7.4.2 Nabíjení a ochrana

Také je zapotřebí zajistit nabíjení baterií, pro tento účel byl vybrán modul s IO TP4056 + DW01A, MOSFET FS8205A (obr. 7.7). Tento modul je vhodný pro dobíjení jedné nebo dvou paralelně zapojených baterií 18650. O nabíjení se stará IO TP4056, který dokáže měnit nabíjecí proud od 130 mA do 1 A podle toho, jak se baterie nabitá a tím zajistit, aby nedošlo k poškození baterie.

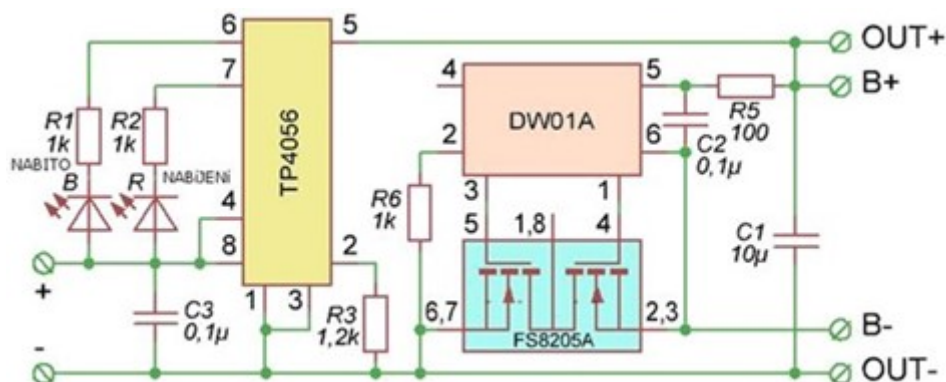


Obrázek 7.7: Snímek nabíjecího modulu [27]

Nabíjení baterie je ukončeno, pokud je svorkové napětí baterie 4,2 V a toto napětí pak na článku udržuje. Pokud je baterie vybitá pod svorkové napětí 2,9 V dochází k rekondičnímu nabíjení nízkým proudem. Ochranu proti nadměrnému vybití, nadměrnému proudu a zkratu zajišťuje DW01A a MOSFET FS8205A. Pokud při vybití klesne svorkové napětí baterie pod 2,4 V odpojí bateriový článek od spotřebiče a opět ho připojí až bude dosaženo svorkového napětí 3 V. Nadproudová ochrana a ochrana proti zkratu zareaguje, pokud bude vybíjecí proud větší než 3 A. Rozměry modulu jsou 17x28 mm.[27]

Modul má šest vývodních pinů:

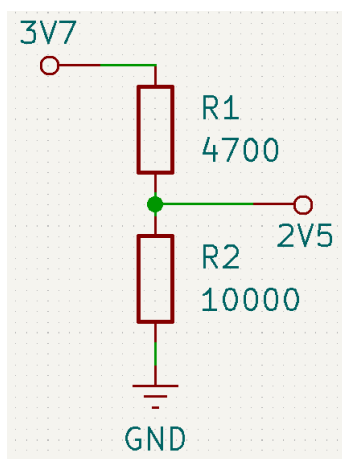
- IN+ - přivádíme napětí 4,5 až 6 V
- IN - - uzemnění
- B+ - připojíme kladný pól baterie
- B- - připojíme záporný pól baterie
- OUT+ - přivádíme ke spotřebiči
- OUT- - uzemnění
- Modul má také USB Mikro, které můžeme využít pro napájení modulu



Obrázek 7.8: Schéma zapojení nabíjecího modulu [27]

Také by bylo vhodné měřit napětí baterie a dát uživateli vědět, jak je baterie nabitá, aby mohl měřící zařízení dát nabíjet. K tomu nám bude stačit jednoduchý napěťový senzor, který bude snímat svorkové napětí baterie a tuto informaci pak ESP32 odešle do webové aplikace.

Jelikož napětí baterie přesahuje hodnotu 3,3 V, které je maximální hodnotou pro ADC převodník, musí být baterie připojena k ESP32 přes odporový dělič. Pokud je tato hodnota překročena může dojít k poškození ADC převodníku v ESP32. Schématické znázornění lze vidět na obrázku 7.9.



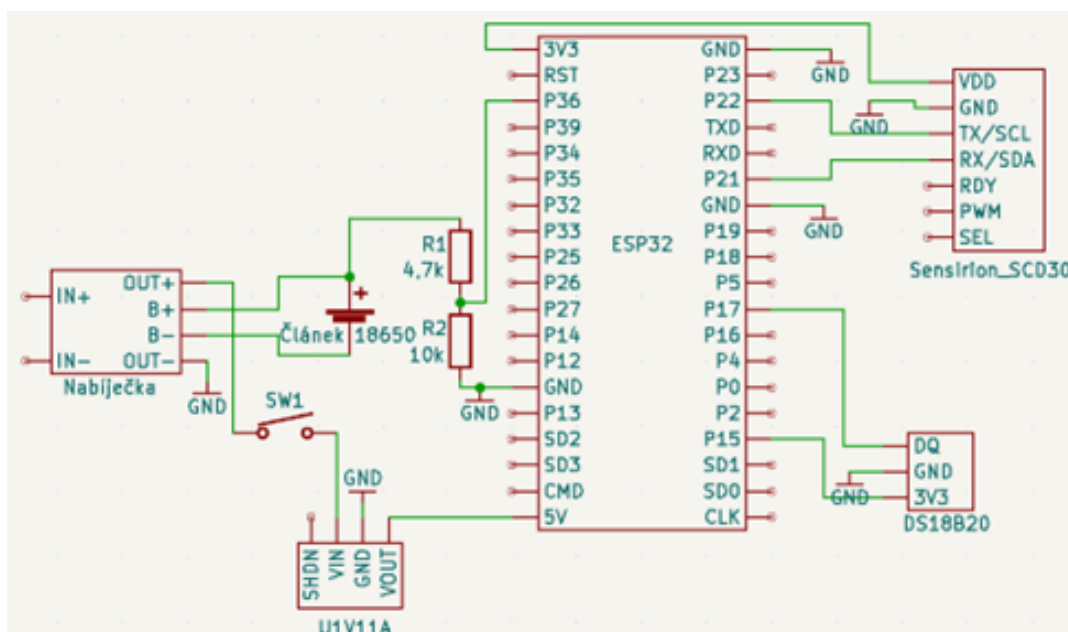
Obrázek 7.9: Schéma vlastního zapojení odporového děliče

8 Zapojení

V této kapitole bude popsáno, jak je celé měřící zařízení pro určení koncentrace CO₂ zapojeno. Na které piny ESP32 jsou jednotlivé komponenty připojeny a jak jsou jednotlivé komponenty vzájemně propojeny.

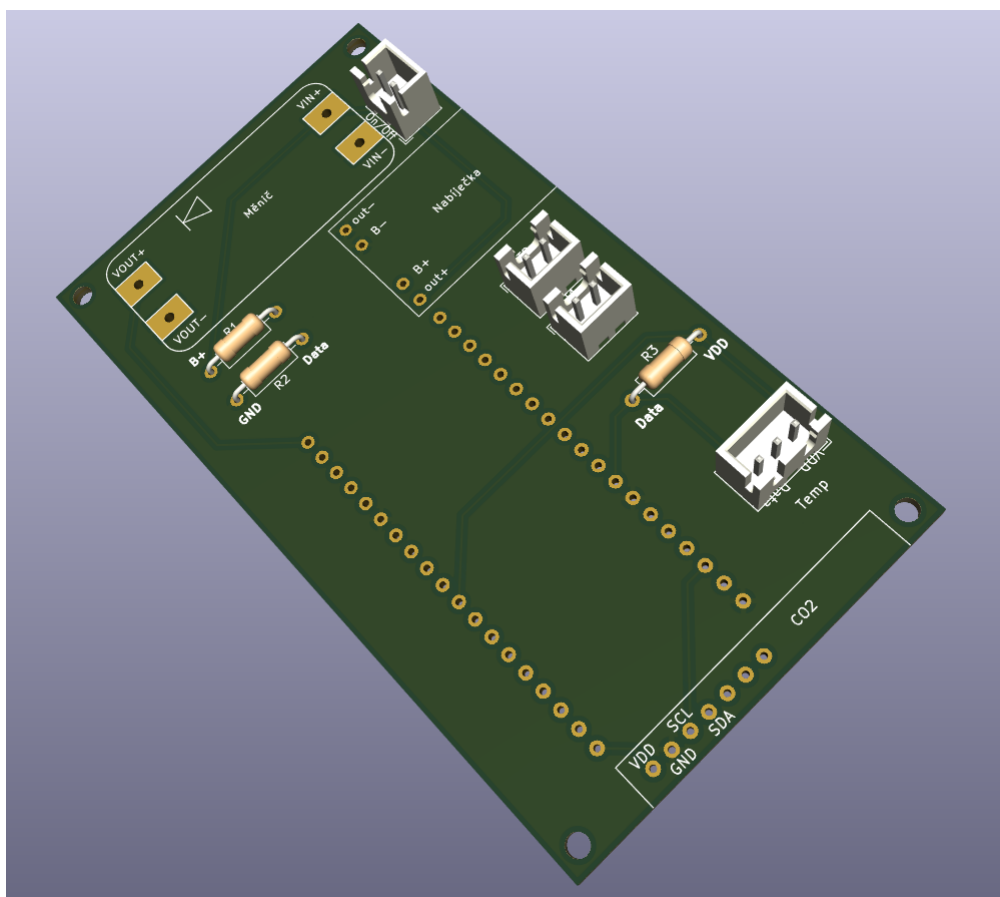
Nejdůležitější částí je senzor snímající koncentraci CO₂. Senzor SCD30 připojíme přes čtyři piny VDD, GND, SCL, SDA. Senzor bude napájen 3,3 V, a proto ho napojíme na ESP přes pin 3V3, GND připojíme na uzemnění, SCL připojíme na pin GPIO22 a SDA připojíme na GPIO21. Tyto dva piny se starají o komunikaci. Dalším senzorem je teplotní senzor DS18B20. U tohoto snímače připojíme VDD na pin GPIO15, GND připojíme na uzemnění a DQ připojíme k pinu GPIO17. Dále připojíme odpor 4,7 kΩ mezi VDD a DQ.

Paralelně zapojené baterie připojíme k nabíjecímu modulu, kdy kladný pól baterií připojíme k pinu B+ na modulu a záporný pól baterií připojíme k pinu B-. Kladný pól baterií dále připojíme na odporový dělič, který připojíme k ESP32 na pin GPIO36. Piny IN+ a IN- na modulu nebudou využívány, protože napájení modulu při nabíjení baterie bude probíhat přes USB Mikro. Pin OUT- připojíme na uzemnění a pin OUT+ připojíme na pin VIN na napěťovém regulátoru U1V11A. Mezi tyto piny připojíme posuvný vypínač. Pin GND připojíme na uzemnění a pin VOUT připojíme k ESP32 na pin 5V. Schéma celého zapojení zařízení je zobrazeno na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Schéma vlastního zapojení měřícího zařízení

Podle tohoto zapojení byla následně navržena deska plošných spojů. Pro návrh desky byl použit program KiCad a následná výroba byla zadána u české firmy Gatemala PCB a.s. Na desku jsou přímo napájeny tři rezistory, dva pro napěťový dělič a jeden jako pull up rezistor pro DS18B20. Dále na desce bude pevně zapájen napěťový regulátor a nabíječka. Pro ESP32 budou na desce připájeny dvě dutinkové lišty každá s devatenácti piny, z důvodu jednoduchého vyjmutí a přeprogramování. Pro senzory a baterie jsou na desce napájeny konektory JST-XH.



Obrázek 8.2: 3D snímek DPS z programu KiCad

9 Programové řešení

Celý řídicí software je psán v jazyce C/C++ ve vývojovém prostředí PlatformIO, který byl instalován jako rozšíření do textového editoru Visual Studio Code od společnosti Microsoft. Jedná se o celkem pokročilý editor, který obsahuje zvýrazňování syntaxe a kontextový našeptávač. Výhodou vývojového prostředí PlatformIO je, že obsahuje vestavěný vyhledávač knihoven, které lze jednoduše stáhnout a implementovat. Tyto knihovny jsou buď přímo od výrobců periférií nebo od členů rozsáhlé komunity.

Soubor zdrojového kódu je rozdělen do dvou hlavních funkcí *setup()* a *loop()*. Dále byly napsány funkce, které se starají o samotné měření a odeslání dat. Funkce *setup()* se spouští pokaždé, když se ESP32 zapne, restartuje nebo probudí z hlubokého spánku. Probíhá v ní inicializace knihoven, komunikace a také se v ní ESP32 poprvé připojí k WiFi a synchronizuje si čas. Ve funkci *loop()* se využívají funkce na měření a odeslání dat a také se zde rozhoduje, zda bude ESP32 usnuto nebo bude pokračovat v nekonečné smyčce.

9.1 Komunikace

Komunikace s webovou aplikací je zajištěna pomocí WiFi, což je označení pro standard IEEE 802.11, který popisuje bezdrátovou komunikaci mezi zařízeními (počítači, notebooky, telefony atd.). Tato komunikace se také nazývá Wireless LAN (WLAN). Tato technologie využívá bezlicenčního frekvenčního pásma. ESP32 využívá k WiFi komunikaci protokol IEEE 802.11b/g/n, který posílá rádiový signál o frekvenci 2,4 GHz.

K připojení ESP32 k WiFi síti byla využita knihovna *WiFi.h*. Byly definovány dvě proměnné *WIFI_SSID* a *WIFI_PASS*, ve kterých jsou uloženy jméno a heslo k WiFi síti. K samotnému připojení byla využita funkce *WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS)*.

Ke komunikaci ESP32 se senzorem SCD30 byl využit komunikační protokol I²C navržený firmou Phillips. I²C (Inter Integrated Circuit) je sériová sběrnice, která se skládá ze dvou vodičů SDA (Seriál Data Line) a SCL (Seriál Clock Line) a slouží ke komunikaci a přenosu dat mezi jednotlivými integrovanými obvody. Tato sběrnice rozděluje zařízení na řídicí (master) a řízené (slave). Řídicí zařízení zahajuje a ukončuje komunikaci a generuje hodinový signál SCL. Řízené zařízení je adresováno řídicím a plní jeho požadavky. Na jednu I²C sběrnici může být připojeno až 128 zařízení najednou. Přenosová rychlost se pohybuje od 100 kbit/s až do 400 kbit/s [29]. K vyčtení dat ze senzoru byly využity dvě knihovny *Wire.h* a *SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h*.

Komunikace ESP32 a DS18B20 je zajištěna pomocí 1-Wire sběrnice, která byla navržena firmou Dallas Semiconductor. 1-Wire sběrnice se podobá I²C sběrnici jen má nižší datovou propustnost, ale zato má delší dosah. Na této sběrnici může být jen jedno řídicí zařízení, ale může zde být v podstatě nekonečno řízených zařízení, protože každé zařízení má unikátní 64 bitovou adresu, kterou ji řídicí člen adresuje. Přenosová rychlost je 16,3 kbit/s [30], ale je k dispozici režim overdrive, který komunikaci urychluje až desetkrát. Další výhodou této sběrnice je, že z ní zařízení mohou být také napájena, pokud obsahují alespoň 800 pF kondenzátor k uchování náboje pro napájení zařízení během času, kdy je aktivní datový přenos. K získání dat z DS18B20 byla použita knihovna *OneWire.h*.

9.2 Odeslání/uložení dat

K odesílání dat do webové aplikace byla využita knihovna *HTTPClient.h*. Data jsou odeslána jako webový odkaz URL, který odkazuje na skript webové aplikace. Ta zajistí zapsání dat do tabulky a vrátí uživatelem nastavenou délku intervalu mezi měřeními. Tento čas si pak ESP32 zapíše do své paměti, aby ho mohl využít při rozhodování, jestli se uspí nebo pojede nepřetržitě, respektive na jak dlouho se uspí.

```
void send_url(String url){
  HTTPClient http;
  http.setFollowRedirects(HTTPC_STRICT_FOLLOW_REDIRECTS);
  http.begin(url.c_str());
  int http_code = http.GET();
  if (http_code > 0) {
    String payload = http.getString();
    if (http_code == 200){
      File file = SPIFFS.open("/settings.txt", FILE_WRITE);
      file.println(payload);
      file.close();
    }
  }
}
```

Obrázek 9.1: Ukázka vlastního kódu zajišťujícího odeslání dat

Pokud zrovna nebude ESP32 připojeno k WiFi síti, data nebudou ztracena a dojde k jejich uložení na interní paměť ESP32 typu FLASH. Tato data jsou ukládána jako URL odkazy a ihned po obnovení připojení budou odeslána webové aplikaci. Těchto záznamů je na interní uložišťě možno uložit více než 17 000.

O zapsání dat do nekonečné tabulky se stará webová aplikace, která je vytvořena pomocí Google Apps Script a napsána v jazyce JavaScript. Aplikace zapisuje data do Google Sheets, kde je rozdělí do příslušných odstavců podle parametrů. V tabulce je dále využita funkce *QUERY*, která zajistí automatické vykreslení posledních x měření do grafů.

```

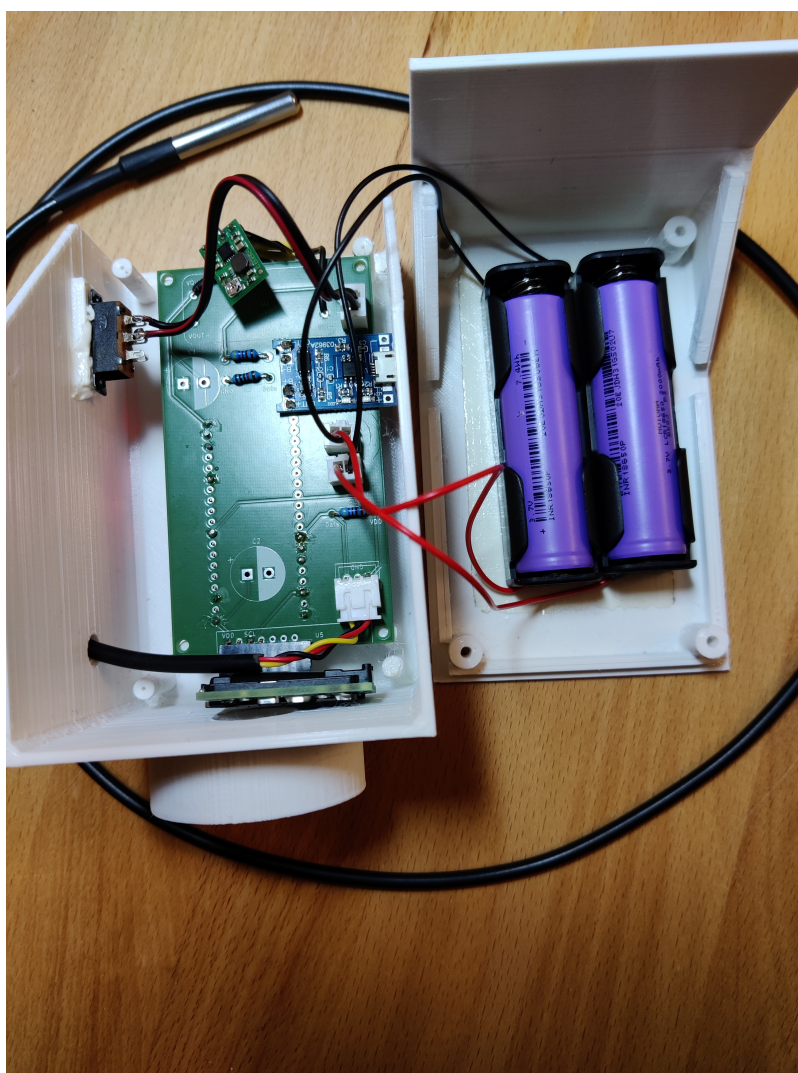
1 function doGet(e){
2   var order;
3   var time;
4   var temp;
5   var bat;
6   var co2;
7
8   time = e.parameters.time;
9   temp = e.parameters.temp;
10  bat = e.parameters.bat;
11  co2 = e.parameters.co2;
12
13  var sheet = SpreadsheetApp.openById('unikátní_klíč_tabulky').getSheetByName('Data');
14  var sheet2 = SpreadsheetApp.openById('unikátní_klíč_tabulky').getSheetByName('Grafy');
15  var newrow = sheet.getLastRow() + 1;
16  order = newrow;
17  var order_cell = sheet.getRange(newrow,1);
18  var time_cell = sheet.getRange(newrow,2);
19  var temp_cell = sheet.getRange(newrow,3);
20  var bat_cell = sheet.getRange(newrow,4);
21  var co2_cell = sheet.getRange(newrow,5);
22
23  order_cell.setValue(order);
24  time_cell.setValue(time);
25  temp_cell.setValue(temp);
26  bat_cell.setValue(bat);
27  co2_cell.setValue(co2);
28
29  return ContentService.createTextOutput(sheet2.getRange('G1').getValue());
30 }

```

Obrázek 9.2: Ukázka vlastního kódu webové aplikace

10 Měření

Pro zařízení byla navržena krabička a kvasná zátka s vodou. Přes ni bude ucházející plyn probublávat a také zabrání, aby v průběhu fermentace nedocházelo ke vstupu okolního vzduchu do nádoby. Krabička i kvasná zátka byly vymodelovány v programu Autocad a vtištěny na 3D tiskárně.



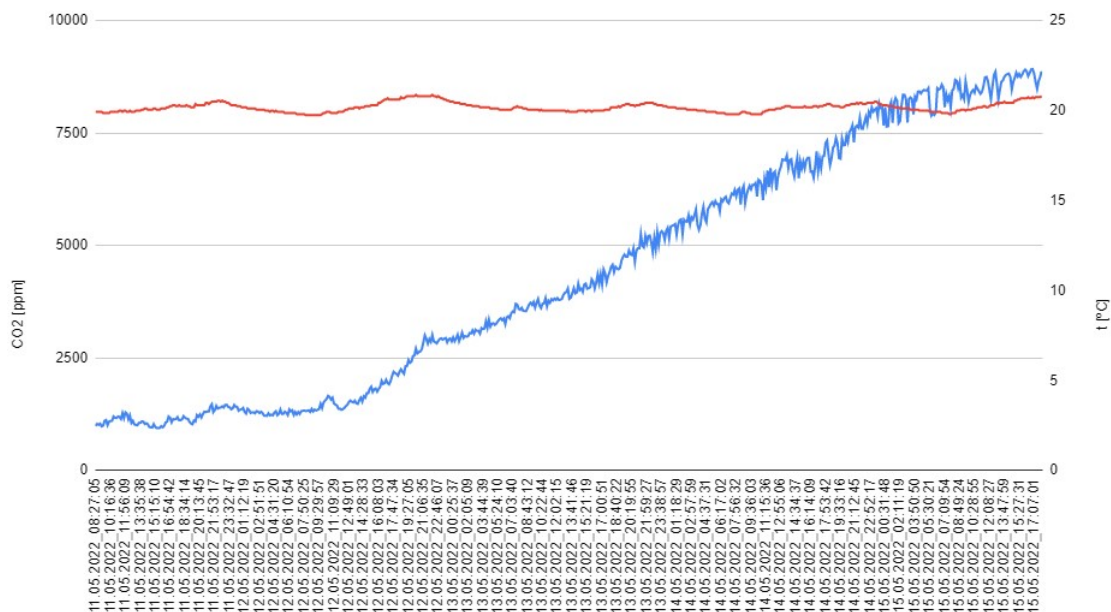
Obrázek 10.1: Fotka sestaveného zařízení

Zařízení bylo prvotně otestováno pro měření koncentrace CO_2 v místnosti. Při tomto měření byla ověřena funkčnost a stabilita měřícího zařízení a také byl ověřen správný chod webové aplikace.

Následně byl vytvořen cukerný roztok pro kvašení. Ten se skládal ze 3 litrů vody, 0,6 kilogramu cukru a 1 gramu kvasinek. Cukr a kvasinky byly důkladně rozmíchány a na kvasnou nádobu byla nasazena kvasná zátka a měřicí zařízení. interval mezi měřeními byl nastaven na 10 minut. Průběh změny koncentrace CO₂ v unikajícím plynu lze pozorovat na obrázku 10.3.

Číslo měření	Čas	Teplota [°C]	Baterie [%]	CO2 [ppm]
637	13.05.2022_11:32:24	20	73,6	3781
638	13.05.2022_11:42:21	20	72,2	3823
639	13.05.2022_11:52:18	20	73,7	3792
640	13.05.2022_12:02:15	20	76,4	3833
641	13.05.2022_12:12:13	20	71,9	3790
642	13.05.2022_12:22:10	20	75	3798
643	13.05.2022_12:32:07	20	72,8	3815
644	13.05.2022_12:42:04	20	75,8	3906
645	13.05.2022_12:52:01	20	74,2	3951
646	13.05.2022_13:01:58	19,94	72,1	3969
647	13.05.2022_13:11:55	20	73,2	4047
648	13.05.2022_13:21:52	19,94	71,4	3817
649	13.05.2022_13:31:49	19,94	74,3	3842
650	13.05.2022_13:41:46	19,94	74,3	3944
651	13.05.2022_13:51:43	19,94	72,2	4053
652	13.05.2022_14:01:41	19,94	73,3	3938
653	13.05.2022_14:11:38	19,94	72,7	3958
654	13.05.2022_14:21:35	20	71,3	4153
655	13.05.2022_14:31:32	20	74,8	4011

Obrázek 10.2: Ukázka automaticky zapsaných dat do tabulky



Obrázek 10.3: Graf naměřeným hodnot v průběhu kvašení

Z grafu můžeme vyčíst že mezi 14. a 15. květnem došlo ke zpomalení kvasného procesu, z důvodu prokvašenosti směsi. Zpomalení procesu je způsobeno úhynem kvasinek vlivem vyšší koncentrace alkoholu, nedostatkem výživy a zkvasitelného cukru.

11 Energetická náročnost

V této kapitole se budeme věnovat odhadnutí celkové doby provozu na jedno nabití, pokud bude zařízení zapnuto nepřetržitě (interval mezi měřeními méně než 30 vteřin). Dále se pokusíme odhadnout počet měření, pokud bude zařízení mezi jednotlivými měřeními v hlubokém spánku.

Jak již bylo zmíněno výše, měřicí zařízení je napájeno ze dvou paralelně zapojených baterií, jejichž nominální napětí je 3,6 V a mají výrobcem uvedenou kapacitu 2000 mAh. Samotné ESP32 se zapnutou WiFi, při napájení 5 V, potřebuje ke svému provozu 160 mA. Senzor koncentrace CO₂ odebírá proud 19 mA a teplotní čidlo 1 mA. Celkový proud, který celé zařízení odebírá je tedy 180 mA. Odhadovaný příkon tedy bude:

$$P_{ESP} = U \cdot I = 5V \cdot 0,180A = 0,9W \quad (11.1)$$

Energie ve dvou paralelně zapojených bateriích je:

$$W_{BAT} = 2 \cdot U \cdot I = 2 \cdot 3,6V \cdot 2Ah = 14,4Wh \quad (11.2)$$

Čas, který dokáží baterie soustavu udržet v chodu je:

$$t = \frac{W_{BAT}}{P_{ESP}} = \frac{14,4Wh}{0,9W} = 16h \quad (11.3)$$

Pokud bude interval mezi jednotlivými měřeními delší než 30 vteřin bude ESP32 mezi nimi usnáno. Doba, která uplyne od probuzení ESP32 z hlubokého spánku do jeho dalšího usnutí se pohybuje v intervalu 15 až 25 vteřin. Tuto dobu nejvíce ovlivňuje, jak dlouho se ESP32 připojuje k WiFi.

Odhad počtu měření, s intervalem 10 minut mezi měřeními, lze spočítat pomocí průměrné doby zapnutí, tedy 20 vteřin, a odebíraného proudu při hlubokém spánku 1 mA.

$$n = \frac{W_{BAT}}{W_{ON} + W_{SLEEP}} = \frac{14,4 \cdot 3600}{0,180 \cdot 5 \cdot 20 + 0,001 \cdot 5 \cdot 580} = 2480 \quad (11.4)$$

To odpovídá 410 hodinám, tedy 17 dnům.

Testováním bylo zjištěno, že zařízení spotřebovalo asi 50% baterie na 1100 měření při intervalu 10 minut. V tomto nastavení by bylo možné zařízení provozovat 15 dní na jedno nabití.

12 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout zařízení, které bude měřit množství CO_2 v plynu unikajícím v průběhu fermentace a také teplotu kvasné směsi a naměřená data bezdrátově přenést do počítače nebo telefonu.

Rešeršní část práce se soustředí na popis způsobů a jednotlivých metod měření koncentrace CO_2 v plynu. Byly zde popsány jednotlivé přístroje, které se využívají v dnešní době a také zde bylo popsáno, jakých fyzikálních jevů jednotlivé přístroje využívají. Dále zde byly popsány typy tepelných senzorů. V neposlední řadě byly sepsány výhody a nevýhody každého způsobu měření.

Druhá část práce se věnuje výběru jednotlivých komponentů, ze kterých bude měřící zařízení sestaveno. Komponenty byly vybírány jako moduly, které byly na českém trhu dostupné. Všechny komponenty mají patřičnou dokumentaci, která byla využita při jejich popisu a zapojení. Celé zařízení je poháněno ESP32, pro měření koncentrace CO_2 byl vybrán modul SCD30 a k určení teploty byl využit senzor DS18B20, napájení zařízení zajišťují baterie 18650 o kapacitě 2000 mAh. O ochranu a nabíjení baterií se stará modul nabíječky Li-ion článku TP4056. Převod napětí baterií na napětí, kterým může být ESP32 napájeno je zajištěn napěťovým regulátorem U1V11A.

Třetí část práce je zaměřena na realizaci samotného měřícího zařízení. Bylo zde přesně popsáno zapojení jednotlivých komponentů, dále bylo vytvořeno schéma zapojení celého zařízení. Podle tohoto schématu zapojení byla navržena a vyrobena deska plošných spojů. Dále zde byl popsán software, který celé zařízení ovládá.

Následně došlo k sestavení měřícího zařízení a ke zkušebnímu otestování (měření koncentrace CO_2 v místnosti) zda samotné zařízení i software fungují správně. Dále jsou prezentovány výsledky měření koncentrace CO_2 v průběhu fermentace. Poslední část práce se věnuje energetické náročnosti zařízení.

Všechny dílčí cíle bakalářské práce byly splněny. Došlo k úspěšnému návrhu a realizaci zařízení pro automatické monitorování CO_2 vytvořeného v průběhu fermentačního procesu. Naměřená data jsou bezdrátově odesílána do webové aplikace, která je zapíše do tabulky. Celé zařízení je napájeno z dobíjecích baterií a bylo úspěšně otestováno.

Možné návrhy na rozšíření této práce by mohly spočívat ve vytvoření algoritmu, který by dokázal odhadnout obsah alkoholu a čas pro dokončení fermentace.

Literatura

- [1] DIXON, Neil M. a Douglas B. KELL. The control and measurement of ‘CO₂’ during fermentations. *Journal of Microbiological Methods*. 1989, 10(3), 155-175. ISSN 0167-7012.
- [2] NEETHIRAJAN, S., D. S. JAYAS a S. SADISTAP. Carbon Dioxide (CO₂) Sensors for the Agri-food Industry—A Review. *Food Bioprocess Technol* 2. 2009, 115-121.
- [3] SPERBER, William H. a Janice SWAN. Hot-loop test for the determination of carbon dioxide production from glucose by lactic acid bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 1976, 31(6), 990-991.
- [4] The Fermentation Process Explained. *Sensorex* [online]. 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://sensorex.com/2021/11/16/the-fermentation-process-explained/>
- [5] PLAATO Airlock V3. *Plaato* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://plaato.io/products/plaato-airlock>
- [6] Biochemie:Metabolismus Sacharidů. *Mojechemie* [online]. 2012 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.mojechemie.cz/Biochemie:Metabolismus_Sacharidů
- [7] Thermal conductivity detector. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_detector
- [8] Chromatografie. *WikiSkripta* [online]. 2014 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Chromatografie>
- [9] TURNER, Diane. Gas Chromatography: How a Gas Chromatography Machine Works, How To Read a Chromatograph and GCxGC. *Technology Networks Analysis & Separations* [online]. 17.3.2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/gas-chromatography-how-a-gas-chromatography-machine-works-how-to-read-a-chromatograph-and-gcxc-335168>
- [10] Izotopy a hmotnostní spektrometrie. *Khan Academy* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecnachemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xefd2aace53b0e2de:hmotnostni-spektrometrie-prvku/a/isotopes-and-mass-spectrometry>
- [11] Infrared Non Dispersive CO₂ Analyzer Working Principle. *Inst Tools* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/infrared-non-dispersive-co2-analyzer-working-principle/>

- [12] Blood Gas Electrodes and Quality Assurance. *Thoracic Key* [online]. 2016 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://thoracickey.com/blood-gas-electrodes-and-quality-assurance/>
- [13] BRUCKENSTEIN, S. a J.S. SYMANSKI. Continuous conductometric sensor for carbon dioxide. *Analytical Chemistry*. 1986, 58(8), 1766-1770.
- [14] Temperature Sensors. *Electronics Tutorials* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html
- [15] Definice termistoru. *RiverGlennapts* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://riverglennapts.com/cs/sensors/784-thermistor-definition-construction-and-applications.html>
- [16] Odporový teploměr. *Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/resistance_thermometer
- [17] Snímače teploty. *Eluc* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/959>
- [18] Termočlánky. *Mendelu* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [19] Compensation and thermoelectric cables. *Günther* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/9dac21f9-48ba-3d69-d796-6d552e88d979?Edition=en>
- [20] ESP32. *Espressif* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [21] ESP32 vývojová deska. *Tipa* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.tipa.eu/cz/esp32-esp32s-vyvojova-deska-24ghz-wifiblueetooth-38-pinu/d-242630/>
- [22] Sensirion SCD30. *Sensirion* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf
- [23] Sensirion SCD30 modul. *Conrad* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/sensirion-modul-plynoveho-cidla-scd30-druh-plynu-oxid-uhlicity-d-x-s-x-v-35-x-23-x-7-mm-2345259>
- [24] EMIL, Škultéty, Pivarčiová ELENA a Karrach LADISLAV. THE COMPARING OF THE SELECTED TEMPERATURE SENSORS COMPATIBLE WITH THE ARDUINO PLATFORM. *Management Systems In Production Engineering*. 2018, 26(3), 168-171. e-ISSN 2450-5781. Dostupné z: doi:10.1515/mspe-2018-0027
- [25] DS18B20 Datasheet. *Laskakit* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/umw_ds18b20_en.pdf

- [26] Teplotní senzor digitální DALLAS DS18B20. *Drátek* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1187-teplotni-senzor-digitalni-dallas-ds18b20.html>
- [27] Pololu Adjustable Step-Up Voltage Regulator U1V11A. *Pololu* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2560>
- [28] Nabíječka Li-Ion článku 1A s ochranou. *Hadex* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m401c-nabijecka-li-ion-clanku-1a-s-ochranou-modul-s-io-tp4056-mini-usb/>
- [29] Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. *Vyvoj.hw* [online]. 2000 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [30] READING AND WRITING 1-WIRE® DEVICES THROUGH SERIAL INTERFACES. *Maxim integrated* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/7/74.html>

Seznam obrázků

3.1	Snímek PLAATO Airlock [5]	12
4.1	Schéma glykolýzy [6]	14
4.2	Odbourávání pyruvátu [6]	14
5.1	Conwayova standardní mikrodifuzní cela [1]	16
5.2	Schématické znázornění Wheatstoneova můstku [7]	17
5.3	Zjednodušené znázornění plynové chromatografie [9]	18
5.4	Schéma hmotnostního spektrometru [10]	19
5.5	Schématické znázornění nedisperzního infračerveného detektoru [11]	21
5.6	Schématické znázornění Severinghausovy elektrody [12]	23
6.1	Snímek různých typů termistorů [15]	25
6.2	Schéma platinového teplotního čidla [17]	25
6.3	Změna rezistivity termistorů podle materiálů [17]	26
6.4	Schématické zapojení termočlásku [19]	26
7.1	Blokové schéma navržené elektroniky	27
7.2	Snímek vývojové desky s ESP32 [21]	28
7.3	Snímek sensorového modulu SCD30 [23]	29
7.4	Snímek tepelného čidla DS18B20 [26]	30
7.5	Snímek napěťového regulátoru U1V11A [27]	31
7.6	Schéma zapojení napěťového regulátoru U1V11A [27]	32
7.7	Snímek nabíjecího modulu [27]	33
7.8	Schéma zapojení nabíjecího modulu [27]	33
7.9	Schéma vlastního zapojení odporového děliče	34
8.1	Schéma vlastního zapojení měřícího zařízení	35
8.2	3D snímek DPS z programu KiCad	36
9.1	Ukázka vlastního kódu zajišťujícího odeslání dat	38
9.2	Ukázka vlastního kódu webové aplikace	39
10.1	Fotka sestaveného zařízení	40
10.2	Ukázka automaticky zapsaných dat do tabulky	41
10.3	Graf naměřených hodnot v průběhu kvašení	41

Seznam příloh

- `ESP_main.cpp` Soubor obsahující zdrojový kód měřícího zařízení
- `APP_main.txt` Soubor obsahující zdrojový kód webové aplikace