

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

AUTOMATICKÁ STOLNÍ DESTILAČNÍ KOLONA

AUTOMATIC TABLE DISTILLATION COLUMN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Ružička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dejdar

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Michal Ružička

ID: 186174

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Automatická stolní destilační kolona

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je komplexní rozbor problematiky destilace alkoholu. V rámci diplomové práce bude proveden návrh zapojení malé destilační kolony včetně řízení procesu destilace (elektricky řízený ohřev se zpětnou vazbou, měření teploty destilace, automatické ukončení destilace, apod.). Dále bude ověřena funkčnost destilace s elektricky ovládaným ohřevem a bude provedena finalizace zapojení včetně SW ovládání (teplota destilace, automatické spuštění, ukončení, apod.). Součástí práce bude také vytvoření alespoň tří vzorových destilačních programů pro automatickou destilaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SCHMICKEL, Helge a Bettina MALLE. Domácí výroba lihovin. Vyd. 2., rev. Přeložil Mojmír RYCHTERA.

Praha: Beta, 2010. ISBN 978-80-7306-430-3.

[2] UHROVÁ, Helena. Domácí výroba slivovice a ostatních destilátů, ovocných šťáv, sirupů a vín. II. vydání.

[Líbeznice]: Víkend, 2015. ISBN 978-80-7433-123-7.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa venuje problematike destilácie alkoholu a jej rozboru pre pochopenie na úrovni konštrukcie vlastného zariadenia. Pojednáva o požiadavkách na destilačné zariadenie a jeho potrebných parametroch pre získanie kvalitného destilátu. Na týchto základoch je vytvorený návrh zapojenia a konštrukcie destilačného zariadenia doplneného o ovládanie a riadenie pomocou mikrokontroléru. Takto skonštruované zariadenie je podrobené rade testov skúmajúcich priebeh potrebných veličín počas destilácie. Súčasťou návrhu a konštrukcie je jednotka zabezpečujúca ochladzovanie vody v okruhu chladenia pár.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

destilácia, alkohol, kolona, automatizácia, regulácia, ohrev, chladenie, mikrokontrolér, Arduino, váha

ABSTRACT

The semester thesis deals with the issue of alcohol distillation and analysis for understanding at the level for construction of the facility itself. It deals with the requirements for the distillation equipment and parameters that may affect the quality of the distillate. On the basis of which is created automated control by microcontroller. This apparatus is exposed to tests and measurements of the required values during distillation. The cooling unit was also built and measured.

KEYWORDS

distillation, alcohol, column, automation, regulation, heating, cooling, microcontroller, Arduino, weight

RUŽIČKA, Michal. *Automatická stolní destilační kolona*. Brno, 2020, 62 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Petr Dejdar

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Automatická stolní destilační kolona“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Petrovi Dejdarovi za odborné vedenie počas práce, jej návrhu a s tipmi na vylepšenie jednotlivých funkcií.

Obsah

Úvod	10
1 Destilácia alkoholu	11
1.1 Proces destilácie	11
1.1.1 Časti destilátoru	11
1.1.2 Kotol	11
1.1.3 Prestupník	13
1.1.4 Chladič	14
1.2 Zdroje pre získanie alkoholu	15
1.2.1 Denaturácia alkoholu	15
1.2.2 Zložky vznikajúce pri fermentácii	16
1.2.3 Ovocný kvas	16
1.2.4 Víno	18
1.2.5 Vysoko percentný cukrový kvas	18
1.3 Destilácia alkoholu	19
1.3.1 Príprava	19
1.3.2 Frakcie	19
1.3.3 Meranie alkoholu	21
1.3.4 Riedenie destilátu	23
1.4 Zrenie	23
1.5 Legislatíva vlastnej destilácie alkoholu	24
2 Rozbor použitých komponentov a súčastí	25
2.1 Kolona	25
2.2 Varič	28
2.3 Kontrolér	28
2.4 Senzory	28
2.4.1 Teplotné čidlo	29
2.4.2 Váha	30
2.5 Akčné členy	31
2.5.1 Spínanie variču	31
2.5.2 Spínanie malých napätí	32
2.6 Chladienie	32
2.7 Vstupno-výstupné zariadenia	33
2.7.1 Displej	34

3	Konštrukcia destilačnej kolony	35
3.1	Návrh	35
3.1.1	Hlavná jednotka	37
3.1.2	Chladiaca jednotka	39
3.2	Popis ovládacieho rozhrania a funkcií	39
3.2.1	Ovládanie	39
3.3	Funkcia destilácie	41
3.4	Nastavenia	43
3.4.1	Wi-Fi	43
3.4.2	Kontrola senzorov	43
3.4.3	Veľkosť zbernej nádoby	44
3.4.4	Reset váhy	44
3.4.5	Kalibrácia váhy	45
3.4.6	Test tlačidla	45
3.4.7	Výpis aktuálnych hodnôt	45
4	Merania a ladenie procesu destilácie	46
4.1	Ladenie regulácie	46
4.1.1	Úvodné pokusy a overenie funkčnosti návrhu	46
4.1.2	Prvá destilácia	49
4.1.3	Druhá destilácia	50
4.2	Chladenie	51
4.2.1	Porovnanie výkonnosti peltierových článkov	51
4.2.2	Chladenie destilácie vody	53
4.2.3	Chladenie destilácie alkoholu	54
	Záver	55
	Literatúra	56
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	58
A	Hlavná jednotka	59
A.1	Schéma hlavnej jednotky	59
A.2	Plošný spoj hlavnej jednotky	60
B	Chladiaca jednotka	61
B.1	Schéma chladiacej jednotky	61
B.2	Plošný spoj chladiacej jednotky	62

Zoznam obrázkov

1.1	TXY diagram vyparovania vody-etanolu [14]	12
1.2	Nákres destilačnej kolony	12
1.3	Medený deflegmátor Iberian Copper [7]	13
1.4	Špirálový chladič vľavo a Liebigov chladič vpravo [15]	14
1.5	Kvasná zátka osadená na sude [8]	17
1.6	Refraktometer a pohľad na stupnicu	22
1.7	Graf hustoty roztoku vody a etanolu v závislosti na ich pomere [11]	22
2.1	Destilátor DESTYLEX [2]	26
2.2	Destilátor Royal datering RCAD10 [10]	26
2.3	Destilačná kolona Iberian Copper 2,5l [7]	27
2.4	Elektrický varič [12]	28
2.5	Arduino Nano, [1]	29
2.6	Návrh váhy	30
2.7	Chladiaci okruh	33
3.1	Zapojenie destilačnej kolony a prídavnej chladiacej jednotky	35
3.2	Bloková schéma zapojenia	36
3.3	Upínacia redukcia na chladič	37
3.4	Doska plošného spoju riadenia destilačnej kolony	38
3.5	Doska plošného spoju chladiacej jednotky	40
3.6	Ukážka displeju v menu	40
3.7	Ukážka displeju počas destilácie v automatickom režime	41
3.8	Ukážka displeju počas destilácie v manuálnom režime	42
3.9	Zobrazenie aktuálnych hodnôt senzorov	44
4.1	Graf destilácie vína v závislosti na čase [s], prvá verzia riadenia	48
4.2	Graf destilácie vína v závislosti na čase [s], verzia riadenia prvej destilácie	49
4.3	Graf destilácie ginu v závislosti na čase [s], verzia riadenia druhej destilácie	50
4.4	Porovnanie rôznych konfigurácií peltierových článkov	52
4.5	Teploty vody v okruhu chladenia počas destilácie vody	53
4.6	Teploty vody v okruhu chladenia počas destilácie vína	54
A.1	Schéma zapojenia hlavnej jednotky	59
A.2	Plošný spoj zapojenia hlavnej jednotky	60
B.1	Schéma zapojenia chladiacej jednotky	61
B.2	Plošný spoj zapojenia chladiacej jednotky	62

Zoznam tabuliek

2.1	Porovnanie spínacích prvkov [6]	32
4.1	Záznam hodnôt destilácie 7,5 l 10 % vína	47
4.2	Tabuľka porovnania rôznych konfigurácií zapojenia chladenia	51

Úvod

Sprevádza ľudstvo už od počiatkov. Je s ním pevne spätý. Má pevné miesto vo väčšine aspektov života. Využíva sa v technike, medicíne, náboženstve, spoločenských akciách, ale aj počas bežných dní. Reč nie je o ničom inom, ako alkohole.

Existuje viacero druhov alkoholov. Každý má svoje uplatnenie v inej oblasti. Pod obecným pojmom alkohol najčastejšie myslíme etylalkohol. Etanol je obsahom každého alkoholického nápoja. V nápojoch určených pre konzumáciu sa pohybuje v koncentráciách od jednotiek percent až po vysoké desiatky percent. Pre konzumné účely sa získava z plodín bohatých na cukry. Procesom kvasenia sa tieto cukry premieňajú za pomoci kvasiniek na alkohol. Vznikajú tak nápoje ako pivo, víno, prípadne ovocný a iný kvas. Zvýšenie percenta v objeme sa docieľuje najčastejšie destiláciou. Tá má veľmi dlhú tradíciu hlavne v Európe. Využívala sa ako efektívny spôsob uskladnenia, kedy pri koncentrácii vyššej ako cca 20% dochádza k zastaveniu hnilobných a kvasných procesov. Slúžil v nich ako konzervačná látka. Tým bolo možné docieľiť, aby pri dlhých plavbách loďou a nevhodných podmienkach skladovania nepodliehal prepravovaný náklad skaze.

Cieľom tejto práce je rozbor destilácie alkoholu s následným využitím poznatkov pre zhotovenie vlastnej destilačnej kolony. Destilačná kolona bude doplnená o zariadenie sledovania a kontroly priebehu destilácie, kedy odpadá užívateľovi pracovné riadenie celého procesu. Súčasťou práce bude vytvorenie a odladenie programov pre jednotlivé druhy destilácie. Budú nimi destilácia vína a iných nízkopercentných alkoholických nápojov. Následná druhá destilácia vzniknutého lutru. Okrem toho aj programy pre destiláciu nielen macerátov za studena, ale aj využitie parnej macerácie bylín a iných plodov.

V rámci doplnenia funkcií destilačnej kolony pre jej jednoduché používanie bude vytvorená aj chladiaca jednotka pre chladenie pár pomocou uzavretého vodného okruhu. To za využitia peltierových článkov ako súčasti, ktorá umožní dodatočné zníženie teploty vody pod úroveň akú by bolo možné dosiahnuť samotným chladením vody pomocou vzduchu.

Účelom práce je ukážka možností jednoduchej platformy k automatizovaniu procesu, v ktorom je kladený dôraz na skúsenosť obsluhy. Priblížiť tak problematiku tejto oblasti elektrotechniky zrozumiteľnou cestou laikom. To všetko na obecné známom a zaujímavom procese destilácie. Výsledné vzorky však nie sú určené ku konzumácii.

1 Destilácia alkoholu

Táto kapitola sa bude venovať procesu destilácie a s ním spojenými obecnými fyzikálnymi a chemickými zákonitostami, ktoré sú pri nej uplatňované. Hlavné zameranie bude na alkohol - spôsoby jeho získavania z prírodných zdrojov, samotná destilácia a oddeľovanie jeho zložiek pri procese destilácie. Poslednou časťou tohto celku je priblíženie receptúr pre získanie najznámejších a najrozšírenejších destilátov. Záverom kapitoly je venovaný text aj právnej úprave destilácie v Českej republike.

1.1 Proces destilácie

Destilácia teplom využíva zákonitosti rôzneho bodu varu pre rôzne kvapaliny. Čistá demineralizovaná voda má teplotu bodu varu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jej teplota počas zohrievania narastá až po dosiahnutí bodu varu. V momente dosiahnutia tejto teploty sa začína vyparovať z celého svojho objemu, nie len zo svojho povrchu. Etylalkohol má bod varu oproti vode nižší, a to už pri $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zmena intenzity ohrevu pri dosiahnutí bodu varu má za výsledok len zmenu rýchlosti vyparovania. Teplota ostáva rovnaká a nemení sa až do odparenia celého objemu zohrievanej látky.

To znamená, že je možné oddeliť etylalkohol od vody počas destilácie. Teplota bodu varu takéhoto roztoku však leží medzi bodmi varu oboch látok. Je závislá na pomere jednotlivých látok, čo je možné si prezrieť v nasledujúcom grafe. [4]

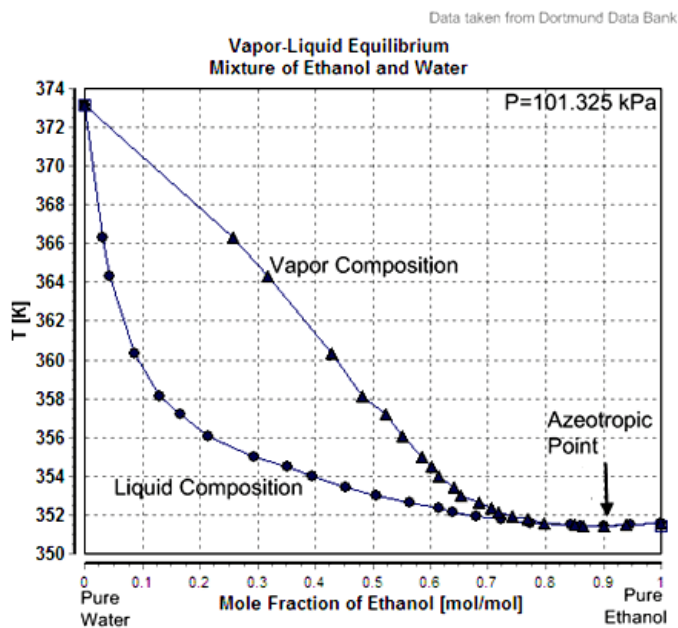
1.1.1 Časti destilátoru

Destilačné zariadenie je vo svojom princípe jednoduchým prístrojom. Nákres s hlavnými časťami je znázornený na obrázku 1.2.

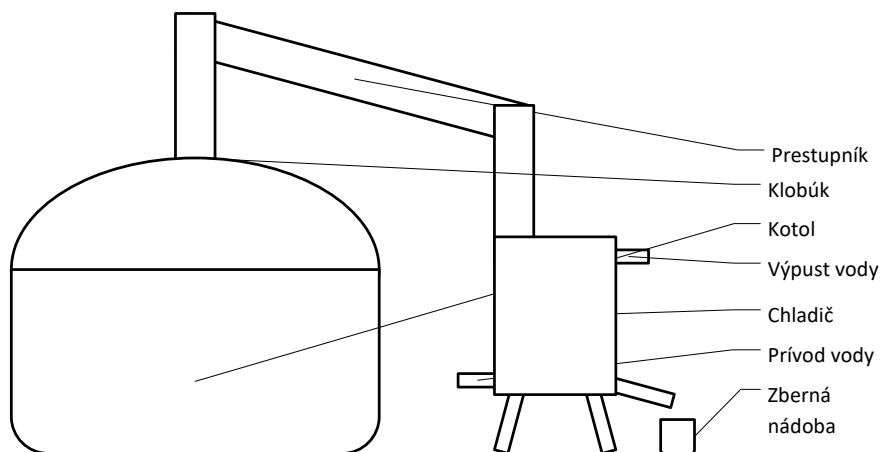
V kotle je ohrievaný externým zdrojom tepla materiál, ktorý chceme destilovať. Jeho parami je plnený klobúk. Pary následne postupujú cez prestupník do chladiča. V ňom sú ochladzované pretekajúcou vodou a kondenzujú naspäť z plynného skupenstva do kvapalného a sú zachytávané v zbernej nádobe.

1.1.2 Kotol

Existujú dve základné varianty kotla. Sú ním jednoplášťové a dvojnoplášťové. Hlavný rozdiel spočíva, ako už názov napovedá, v dvojitom opláštení. Priestor medzi vnútornou a vonkajšou stenou je vyplnený spravidla olejom zaistujúcim prenos tepla do vnútra kotla. Zabraňuje sa tak pripaľovaniu hustých zmesí, napríklad kvasu, ku stenám kotla.



Obr. 1.1: TXY diagram vyparovania vody-etanolu [14]



Obr. 1.2: Nákres destilačnej kolony

V prípade jednoplášťového kotla je pre zamedzenie pripalovania možné použiť aj kovové sito na dne kotla, ktoré je vyvýšené o niekoľko centimetrov. Veľmi často je možné sa stretnúť aj s miešadlom, ktoré udržiava v pohybe destilovaný materiál - vo variante ručného, alebo elektrického pohonu.

Pre prípad macerovania parami sa do kotla vkladá košík. Košík je naplnený surovinami, ktorých arómou si želáme obohatiť výsledný destilát. Nachádza sa nad

hladinou a je vystavený parám destilátu. Môže ísť však rovnako ako v prípade vložky proti pripalovaniu o sito. Je však podstatne vyššie ako spomínaná vložka a v prípade jeho použitia je možné kotol naplniť iba pod jej úroveň s dostatočnou rezervou. [4]

1.1.3 Prestupník

Konštrukciou výrazne vplýva na výsledný produkt, ktorý z destilátoru dostaneme. V jeho najzákladnejšej podobe môže ísť len o trubkové spojenie medzi kotlom a chladičom. Je potrebné dbať na dostatočný vnútorný priemer tohto spojenia. Skladá sa zo stúpacej a klesacej časti.

Stúpacia časť by mala smerovať kolmo na hrniec. Jej výška ovplyvňuje spätný tok (Reflux). Čím je vyššia, tým sú pary ochladzované vo väčšej miere. Rovnakou mierou vplýva aj jej priemer. Pri malom priemere je plocha, s ktorou má para kontakt pomerne väčšia ako v prípade širšej. Látky s vyšším bodom varu preto kondenzujú skôr a stekajú naspäť do kotla. Dostávame tak produkt s vyšším obsahom alkoholu. Zákonite so spätným tokom a kondenzáciou časti pár prichádzame o arómu. V extrémnych prípadoch je možné stúpaciu časť vynechať.

Najvyšší bod prestupníku by mal byť osadený teplomerom. Len v tomto bode je možné odmerať správnu teplotu pár pred vstupom do chladiča. [4]



Obr. 1.3: Medený deflegmátor Iberian Copper [7]

V prípade, že je požadovaný destilát o vyššom obsahu alkoholu sa používa rektifikácia a deflegmátor. Zaradením týchto častí do zariadenia získame možnosť v jednom destilačnom cykle získať produkt s dostatočným obsahom alkoholu a vyhnúť sa tak následnej druhej destilácii. Deflegmátorom je podporovaný spätný tok. Chladí sa tak plocha stúpacej časti. Pre jeho konštrukciu existuje mnoho variánt - tanierové, štrbinové, alebo trubkové. Rektifikáciou docielime viacnásobnú destiláciu v jednom kroku. Pary postupne kondenzujú a naplňajú jednotlivé poschodia. Prepad medzi poschodiami prepúšťa naspäť do kotla destilát s nižším obsahom alkoholu v prípade jeho naplnenia. Tie bývajú opatrené priezormi pre vizuálnu kontrolu priebehu

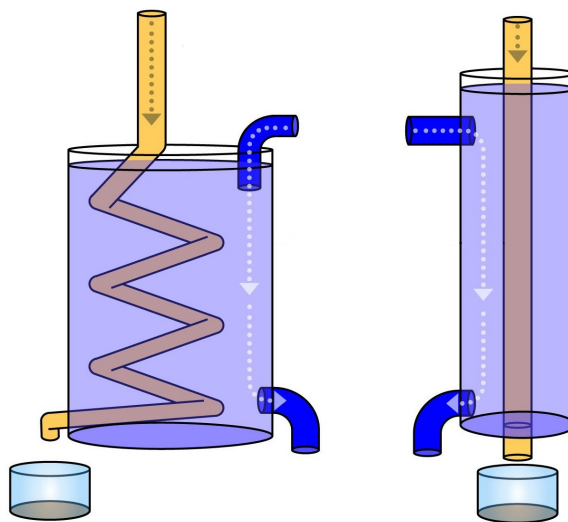
destilácie. Jednotlivé stupne je možné zaradiť alebo vyradiť pre docielenie požadovaného účinku destilácie. Destilačné zariadenia tohto druhu sú podstatne náročnejšie na skúsenosť obsluhy. Pri príliš veľkom účinku stupňov môže celý proces destilácie ustať. [5]

1.1.4 Chladič

Výstup priestupníku smeruje do chladiča. Patrí medzi posledné prvky destilačnej kolony. Vo väčšine prípadov ide o trubicovú špirálu ponorenú v chladiacej nádobe. Nachádzajú sa na nej dva vstupy a dva výstupy. Prvým vstupom je už spomínaný prívod pár. Tie v chladenej špirále kondenzujú a stekajú k výstupu. Z neho sa následne destilát zachytáva do zbernej nádoby.

Druhým okruhom je prívod a vývod chladiaceho média. Najčastejšie ide o vodu. Na spodnej strane chladiča je privádzaná chladná voda. Voda schladí destilát na najmenšiu možnú teplotu. Voda sa následne v chladiči zahrieva a stúpa k výstupu. V týchto miestach sú privádzané pary, ktoré sú postupne schladzované. V prípade opačného zapojenia chladiaceho okruhu hrozí, že vytekajúci destilát bude mať príliš vysokú teplotu a bude z jeho objemu vo väčšej miere odparovaný alkohol do priestoru.

Výstup chladiacej špirály však nesmie byť nikdy na tesno spojený so zbernou nádobou. Hrozí tak pretlakovanie destilačnej kolony a jej poškodenie. V krajnom prípade až explózia narastajúcim tlakom pár. [4]



Obr. 1.4: Špirálový chladič vľavo a Liebigov chladič vpravo [15]

1.2 Zdroje pre získanie alkoholu

Spôsobov akými je možné získať etylalkohol existuje viacero. Nižšie sú popísané jednotlivé metódy a následné spracovanie pre použitie v potravinárstve a výrobe destilátov určených ku konzumácii.

Syntetický lieh

Vyrábaný je prevažne z etylénu. Ide o čisto chemický postup, keď je etylén hydratovaný vodou. Pri reakcii molekuly vody a molekuly etylénu vzniká získavaný etylalkohol. Okrem neho však vzniká mnoho iných látok, ktoré môžu byť v získanom produkte zastúpené vo väčšej, či menšej miere. Takto získaný etylalkohol obsahuje asi 5% vody. [13]

Kvasný lieh

Pre jeho výrobu sú používané špeciálne kultivované kvasinky, ktoré menia cukry na etylalkohol. Pri činnosti spotrebovávajú cukry obsiahnuté v ich prostredí na oxid uhličitý a želaný etylalkohol. Na rozdiel od výroby alkoholu synteticky je výťažnosť pri tomto procese 10-15%. Špeciálne druhy kvasiniek dokážu vyprodukovať až 20% koncentráciu alkoholu. Oproti výrobe syntetického liehu je tento postup časovo náročnejší a získaný produkt obsahuje mnoho iných látok, ktoré produkujú iné druhy mikroorganizmov spracovávaním ostatných surovín z prostredia mimo cukrov. [5]

1.2.1 Denaturácia alkoholu

Denaturovanie alkoholu má za následok jeho nemožnosť použitia v potravinárstve a na výrobu alkoholických nápojov. Do alkoholu sú pridávané látky, ktoré ovplyvňujú jeho požívateľnosť pre človeka. Ako napríklad chuť, vôňu, alebo priamo látky spôsobujúce zdravotné problémy. Následne je možné len veľmi obtiažne ich od etylalkoholu oddeliť. a to z dôvodu rovnakých fyzikálnych vlastností. Napríklad bodu varu, kedy je prakticky nemožné ich bezpečne oddeliť destiláciou.

Tento postup znehodnotenia pre použitie v potravinárstve znamená zníženie daňového zaťaženia takéhoto výrobku. Kedy použitie takéhoto alkohol pre technické, chemické, farmaceutické a iné použitie nie je pridanými látkami nijak postihnuté. [13]

1.2.2 Zložky vznikajúce pri fermentácii

Etanol

Hlavný podiel destilátu. Jeho bod varu je 78,3 °C. Ide o bezfarebnú tekutinu s typickou vôňou a pálivou chuťou. [4]

Metanol

Metanol má tiež nemenej podstatné zastúpenie v destiláte ako etanol. Limitom je 15 g/l. Nijakým spôsobom neovplyvňuje chuť a arómu výsledného destilátu. Je tak nemožné rozoznať jeho koncentráciu v domácich podmienkach bez laboratórnych testov. S nižším bodom varu ako má etyl alkohol sa dá doceliť zníženie jeho obsahu počas destilácie, zachytením prvých kvapiek destilátu do samostatnej zbernej nádoby. Nie však jeho úplná eliminácia. Pre ľudský organizmus sa jedná o jedovatú látku. Etanol však pôsobí ako protijed. [3]

Vyššie alkoholy

Vznikajú z aminokyselín. Ide hlavne o amylalkoholy s koncentráciou približne 80 %, izobutanol 15 %, propanol, izopropanol a iné. [3]

Glycerín

Rovnako ako etylalkohol, tak aj glycerín vzniká z cukru. Zmení sa naň cca 5 % obsiahnutého cukru. Jeho teplota varu je príliš vysoká, až 290 °C. Takže do výsledného destilátu sa nedostáva. [3]

Ostatné

K látkam, ktoré tvoria aromatickú zložku destilátu patrí benzaldehyd, acetaldehyd a furfural. Okrem nich mikroorganizmy kontaminujúce kvas produkujú organické kyseliny. Ide o látky s nižším, ale aj vyšším bodom varu, ako má etanol. Oddelujú sa v úkvape a dokvape. Okrem nich z kôstiek rozkladom amygdalínu vzniká aj kyselina kyanovodíková. Je možné ju redukovať kvasením bez kôstok z plodov. Ak to nie je možné, je treba kôstky odfiltrovať po rozpade dužiny a ich sadnutí na dno. K destilácii sa následne využíva kvas zbavený všetkých jadier a kôstok. [3]

1.2.3 Ovocný kvas

V našich končinách jeden z najbežnejšieho spôsobu spracovania nadmernej úrody ovocia. Pre jeho základ je možné použiť takmer akékoľvek ovocie. Fantázii sa medze nekladú. Treba však pamätať na to, že ovocie musí byť skvasiteľné. Ideálnymi ovocím

sú napríklad slivky, jablká, čerešne, marhule... Dobrý a kvalitný kvas je predpoklad na chutný destilát. Použité ovocie by sa malo zbaviť nečistôt a nezdravých častí.

Ovocie bohaté na vodu je dobré rozdrviť. Pre podporenie a naštartovanie fermentácie je odporúčané pridať kultúru kvasníc a prídavok cukru. Tým sa redukuje množstvo nechcených mikroorganizmov, ktoré fermentujú iné látky ako želaný etylalkohol. Dôležitým faktorom je, aby fermentácia prebiehala v nádobe s oddelením od okolitého prostredia. Okrem nežiadúcich mikroorganizmov kvasu neprospieva ani kyslík v atmosfére, ktorý podporuje hnilobné procesy. K tomu slúži kvasná zátka. Dovoľuje uniknúť vznikajúcemu oxidu uhličitému, ale nevpustí do vnútra nič z okolia. Jej princíp je naplnenie trubičky v tvare najčastejšie ležatej 'S' vodou. Rôzne druhy kvasných zátok sú zobrazené na obrázku nižšie.

Fermentácia je ukončená po spotrebovaní cukru, alebo v horšom prípade po úhyne kvasiniek. Je to spozorovateľné ustaním produkcie oxidu uhličitého. V prípade, že fermentácia ustala v dôsledku spotrebovania všetkého cukru je nevyhnuté čím skôr prejsť k procesu destilácie. Kvasy s vysokým obsahom alkoholu je možné skladovať v uzavretých nádobách dlhší čas, keďže vzniknutý alkohol slúži ako účinná konzervačná látka. [4]



Obr. 1.5: Kvasná zátka osadená na sude [8]

1.2.4 Víno

Výroba vína prebieha mierne odlišne na rozdiel od kvasného procesu pre výrobu destilátov. Hlavným rozdielom je predspracovanie ovocia pre proces fermentácie. Pokiaľ čo pre ovocný kvas sa používajú celé plody aj s dužinou, tak plody pre víno sú odšťavované. Najčastejšie lisovaním, aby sa neporušili šupky, ktoré obsahujú najviac pektínu.

Fermentácia prebieha v kvasných nádobách. Nádoby sú dezinfikované spaľovaním sírnych knotov v ich vnútri, alebo roztokom disiričitanu draselného. Pre jeho správnu fermentáciu je pridávaná kultúra kvasiniek, ktorá rozbehne celý proces a zníži rozmnoženie nežiadúcich mikroorganizmov. Tomu napomáha aj odizolovanie nádoby kvasnou zátkou. Pri priemyselnej výrobe vína vo veľkých tankoch je treba zvlášť pozorne sledovať teplotu vo vnútri kvasnej nádoby. Tak veľké objemy sa totiž nemusia stíhať samé chladiť iba pomocou okolitého vzduchu. Využívajú sa preto rôzne spôsoby ako teplotu znížiť. Napríklad ochladzovaním tankov tečúcou vodou, alebo chladiacim zariadením inštalovaným priamo vo vnútri tanku.

Pre relatívne nízky obsah alkoholu vo víne je potrebné pri jeho stáčaní klásť dôraz na čistotu a preplach aseptickým prípravkom všetkých hadíc, čerpadiel a ostatných pomôcok. Ideálne bez prístupu vzdušného kyslíka. Víno sa môže totiž infikovať cudzími mikroorganizmami. [4]

1.2.5 Vysoko percentný cukrový kvas

Jednoduchým spôsobom pre základ likérov a destilátov je kvas s použitím čistého cukru. Takto získaný alkohol sa vyznačuje neutrálnou chuťou a arómou. Potrebné suroviny pre jeho výrobu sú iba kvasnice a cukor. Pri použití špecializovaných kvasníc turbo, ktoré odolávajú vysokému obsahu alkoholu je možné získať kvas s obsahom alkoholu až 23 %.

Potrebné množstvo cukru sa rozpustí v teplej vode časti konečného objemu. Po jeho kompletnom rozpustení sa doplní na predom stanovený objem a pridajú sa kvasnice. Tie sú predávané často ako celok so živnou soľou a tekutým aktívnym uhlím. Podľa množstva pridaného cukru a okolitej teploty ustáva fermentácia v dôsledku skvasenia všetkého cukru v priebehu 2-14 dní. Následne je možné použiť číriaci prostriedok pre získanie kryštálovo čistého alkoholu. To však nie je potrebné, nakoľko sa kvasinky do dvoch dní usadia na dne kvasnej nádoby a jej obsah je možné opatrne hadicou prečerpať.

Takto získaný alkohol má nespornú výhodu v tom, že je možné ho priamo použiť. Neobsahuje žiaden metylalkohol, ktorý vzniká z drevnatých častí ovocných kvasov, ako sú napríklad kôstky a jadierka. Preto nie je potrebné ho destilovať a možno ho

použit na výrobu likérov, alebo macerovanie studenou cestou. Vylúčené nie je ani jeho destilovanie a maceráciu parami alkoholu, napríklad pre výrobu ginu. [4]

1.3 Destilácia alkoholu

Postup destilácie môžeme rozdeliť do niekoľko krokov popísaných nižšie. Opísaný bude nielen priebeh a postupnosť úkonov, ale aj parametre, ktoré treba sledovať.

Je treba klásť dôraz v prvom rade na bezpečnosť. Prostredie, v ktorom samotná destilácia prebieha by malo byť dobre vetrané, aby sa zamedzilo koncentrovaniu alkoholových pár v priestore. [4]

1.3.1 Príprava

Prvé kroky pred samotnou destiláciou závisia od toho, čo sa chystáme destilovať. K jednotlivým surovinám treba patrične zariadenie pripraviť.

Kvas, narozdiel od iných vstupných surovín, obsahuje tuhé časti. Patria medzi ne hlavne dužiny samotného ovocia. Môže obsahovať aj kôstky, jadierka, konáriky, listy a iné nechcené predmety. Tých je treba sa zbaviť scedením kvasu. Z pridaných kôstok je v destiláte zvyšovaný obsah kyanovodíku. Filtrácia kvasu sa neodporúča. Pri nej dochádza aj k oddeleniu aj dužiny. Dužinatá časť ovocia obsahuje prevažnú časť aromatických látok. Jej odstránením by sme získali chuťovo nevýrazný destilát.

Pre zamedzenie pripalovania je potrebné obsah kotla riadne miešať. Druhou možnosťou je vložiť na dno kotla sito, ktoré zabráni kontaktu dužiny s dnom kotla. Sito je potrebné vložiť pred naplnením kotla.

Pre nízky obsah alkoholu v kvase je destilovaný až po teplotu pár 95 °C. Zachytávame všetko, čo tečie. Tento surový destilát je destilovaný v druhom kroku, kedy sa oddeľujú jednotlivé frakcie. To platí aj pre destiláciu vína a maceráty.

V prípade macerácie parami alkoholu je potrebné vložiť košík, alebo vyvýšenú plošinu. Tie držia byliny a iné aromatické látky v dostatočnej výške nad hladinou obsahu kotla. Pri macerácii sa medze nekladú experimentovaniu tomu čím a v ktorej fáze destilácie sa destilér rozhodne obohatiť arómu destilátu. [4]

1.3.2 Frakcie

Hlavným predpokladom pre dokonalú chuť a arómu destilátu je správne oddelenie jednotlivých frakcií destilácie. Delia sa na 3 časti, pri ktorých pary obsahujú látky s rôznym bodom varu. Ide o hlavnú zložku, ktorú tvorí etylalkohol. Pred ňou však

získame malú časť výpalku, ktorá obsahuje viac prchavé látky a metylalkohol. V závere získavame výpalok chudobný na alkohol a želané aromatické látky. Nazývajú sa hlava, srdce a chvost.

Pre správne oddelenie jednotlivých frakcií je vhodné nazbierať väčšie množstvo surového destilátu. Pri jedinom pálení nízko percentného kvasu alebo vína získame len malé množstvo surového destilátu. To väčšinou býva príliš malé na dostatočné naplnenie kotla a následné oddelenie frakcií. [3]

Úkvap/hlava

Jedná sa o prvé kvapky, ktoré sa začnú objavovať na výstupe destilačného prístroja po naplnení surovým destilátom. Dané to je teplotami bodu varu zložiek obsiahnutých v tejto frakcii. Začína tiecť približne už pri teplote pár 50 °C. V tomto bode je vhodné znížiť intenzitu ohrevu, aby bolo možné úkvap dostatočne oddeliť. Teplota však naďalej rýchlo stúpa. Po jej spomalení nastáva koniec toku úkvapu. To je približne pri teplote pár cca 80 °C.

Podľa kvality kvasu sa líši aj obsah úkvapu v destiláte. Zabráneniu jeho tvorbe však nie je prakticky možné. Môže sa len znížiť jeho podiel. Predpoklad pre najnižší možný podiel úkvapu je čisté kvasenie. To znamená, zabráneniu vniknutiu nežiadúcich mikroorganizmov podieľajúcich sa na kvasnom procese a použitím len zdravých nehnílych plodov. Úkvap tvorí prevažne metylalkohol. Ten je pre ľudský organizmus jedovatý. Vzniká z pektínu, ktorý je obsiahnutý vo väčšom množstve než inde v tvrdých drevnatých plodoch. Napríklad dula. Dokonalé oddelenie metylalkoholu však nie je úplne možné. Vyteká počas celého destilačného procesu a je obsiahnutý vo všetkých zložkách. Avšak už v takej koncentrácii, ktorá nie je pre ľudský organizmus škodlivá.

Okrem vyššie spomínaného metylalkoholu úkvap obsahuje množstvo iných látok. Sú nimi napríklad kyselina octová, maslová, propiónová, ďalej acetaldehyd, etylacetát, acetón, butanol a hexanol. Je možné ich ľahko čuchom rozoznať. Potrebné je však zriediť úkvap vodou, aby sa potlačila jeho ostrá a páľivá aróma. Následne je možné rozoznať pach acetaldehydu, čo je rozpúšťadlo používané v lepidlách a lakoch. Obecne teda možno povedať, že úkvap na základe čuchu rozoznať podľa pachu riedidla.

Využitie má v mnohých iných prípravkoch, napríklad základ pre čistiace prostriedky, dezinfekcie a mnoho iného. Nie však v potravinárstve. [4] [3]

Prekvap/srdce

Frakcia, ktorej oddelenie a získanie je naším cieľom. Tvorí prevažnú časť získaného destilátu. Jeho hlavnou zložkou je etylalkohol a želané aromatické látky. Objavuje sa

cca od teploty 80 °C. Teplota následne pozvoľna stúpa. Omnoho pomalšie ako pri úkvepe. Zberá sa až do teploty 90-91 °C. Vytekajúci destilát po prekročení tejto teploty už nemá taký obsah alkoholu, aby sa vyplatilo jeho zachytávanie spolu s prekvapom. Okrem toho neobsahuje už skoro žiadne aromatické látky. [4]

Dokvap/chvost

Posledná frakcia, ktorá vyteká z destilačného zariadenia je dokvap. Jeho obsah alkoholu je cca 10-20 %. Nie je preto vhodné miešať ho s prekvapom, kvôli nadmernému zníženiu percentnosti výpalku. Môže sa však zachytávať zvlášť od teploty pár 91 °C až do 95 °C.

Dokvap neobsahuje už takmer žiadnu želanú arómu. Nepříjemne páchne a chutí mdllo. Je však možné ho znova destilovať a získať tak chuťovo a aromaticky neutrálny alkohol. [4]

1.3.3 Meranie alkoholu

Neoddeliteľnou súčasťou výroby liehovín je stanovenie objemového pomeru alkoholu v destiláte. Pre zistenie tejto hodnoty sa využíva rozdiel vlastností vody a alkoholu. Presnejšie ich rôznej hustoty. Pomer týchto látok získame najjednoduchšie pomocou hustomeru. Pre tieto účely však existuje špeciálny hustomer pre meranie koncentrácie alkoholu. Tým je liehomer, ktorého stupnica je ciachovaná už priamo na % obj.

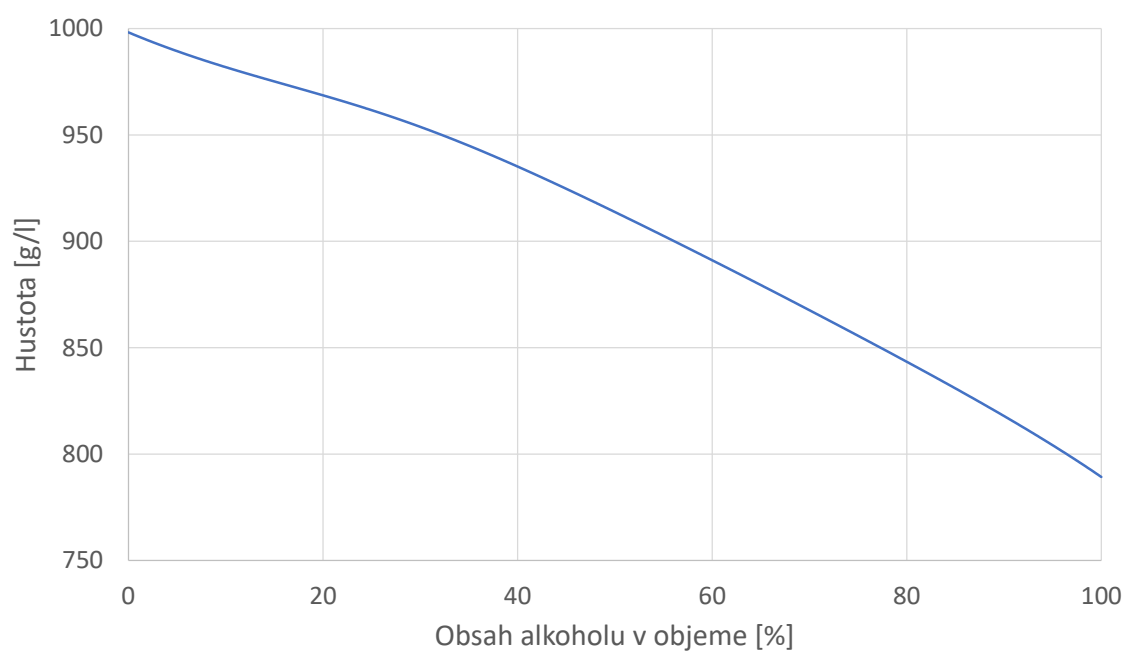
Kvalitnejšie liehomery sú vybavené teplomerom, pretože ich stupnica je platná iba pre jedinú konkrétnu teplotu, ktorá býva na liehomere uvedená. Presnosť merania závisí od možnosti správne odčítať stupnicu. Preto sú presnejšie liehomery určené pre meranie len určitého rozsahu percenta. Presný spôsob odčítania hodnôt je potrebné si zistiť v návode konkrétneho kusu. Využívané je horné a spodné odčítanie. Pri spodnom odčítaní sa orientuje podľa hladiny destilátu. Pri hornom odčítaní podľa výšky, po ktorú destilát vzlína. [5]

Pohodlnejšou metódou je však meranie pomocou ručného refraktometru. Hlavnou výhodou je možnosť zistenia koncentrácie alkoholu už z pár kvapiek odobranej vzorky destilátu. Princípom stanovenia koncentrácie je zmena lomu svetla v závislosti na koncentrácií alkoholu v zmesi rovnako vplyvom jej hustoty. Stupnica môže byť rovnako ciachovaná na rôzne jednotky. [5]

Graf na obrázku 1.7 znázorňuje hustotu destilátu na základe jeho % obj. Je však platný iba pre teplotu 20 °C.



Obr. 1.6: Refraktometer a pohľad na stupnicu



Obr. 1.7: Graf hustoty roztoku vody a etanolu v závislosti na ich pomere [11]

1.3.4 Riedenie destilátu

Na záver destilácie je potrebné upraviť jeho obsah alkoholu na požadovanú hodnotu pridaním mäkkej pitnej vody. Tento proces je nemenej náročný ako samotná destilácia a je možné ním pokaziť výsledok celej práce.

Najčastejšie vzniká pri nesprávnom riedení zákal destilátu. Príčin môže byť niekoľko. V prvom rade postup, použitie príliš mineralizovanej vody alebo vysoký obsah olejov v destiláte. Voda by mala byť prilievaná pomaly a za stáleho miešania pričom obe zložky majú rovnakú teplotu. Zákal vzniká vyzrážaním látok nerozpustných vo vode. Zatiaľ čo v alkohole sú oleje veľmi dobre rozpustné, tak po znížení jeho obsahu nie je destilát schopný rozpustiť všetky zložky a tie sa následne vyzrážajú do formy mliečneho zákalu alebo jemných vločiek.

Pokiaľ sa jedná o zákal vzniknutý vyšším obsahom dokvapú, tak je až nemožné ho odstrániť a pomôže jedine opätovná destilácia. Ak ide o zákal vyzrážaných látok nerozpustných vo vode je veľmi jednoduché ho odstrániť bežným papierovým filtrom. Napríklad papierovým filtrom na kávu. Treba však pamätať, že odfiltrovaním týchto zákalov sa stratí aj časť aromatických látok z destilátu. [4]

1.4 Zrenie

Zriedenie destilátu na požadovanú úroveň obsahu alkoholu by sa mohlo zdať ako posledný krok výrobného procesu. Nie je tomu tak. Okrem skladovania v sklenených demižónoch, kde je destilát uchovávaný je možné ním naplniť drevené sudy.

Pri uchovávaní destilátu v sklenených demižónoch dochádza k ich izolovaniu od okolitého prostredia. V uzatvorenej nádobe už ďalej nepracuje. Preto je vhodné niekoľko dní nechať nádobu otvorenú a prekrytú napríklad kusom textilie, ktorou má hladina kontakt s okolitým prostredím. Pri tom sa chuť a aróma destilátu zjemní a stáva sa lahodnejšia. Ideálnym miestom sú tmavé priestory s teplotou 15-20 °C.

Druhou, vyššie spomenutou možnosťou je destilát nechať dozrieť v drevených sudoch. Najčastejšie využívaným je dubové drevo. Z neho následne destilát prijme farbu a ďalšie chute. Odtieň sa pri tom upraví do zlatej až hnedej podľa dĺžky zrenia. Nie sú však používané v surovom stave. Na záver výroby je sud ošetrený pražením nad ohňom. Takto skladovaným alkoholom býva napríklad brandy a whiskey. Roky pri označení takýchto nápojov udávajú ako dlho prebiehalo jeho zrenie. Tento proces je teda časovo náročný a uskladnený destilát stráca časť objemu alkoholu, ktorý uniká pórmi v dreve. Úbytok je nazývaný ako „Anjelska daň“. Isté druhy alkoholov sa nechávajú dozrieť v použitých sudoch. Vtedy okrem luhovania aromatických látok z dreva prijíma jeho obsah aj časť aróm z predchádzajúcej náplne suda.

Možnosťou ako jednoducho aj doma nechať dozrieť destilát bez použitia drahých sudov je použiť drevené hobliny. Sú k dispozícii rôzne druhy a aj rôzne stupne ich praženia. Tie sú dostupné v špecializovaných predajniach. Následne stačí do skleneného demižónu pridať tieto hobliny a nechať destilát zrieť. Výhodou je možnosť demižón po istom čase, kedy sa necháva obsah vetrať, uzavrieť. Tým sa zamedzí odparovaniu a nestráca sa tak z destilátu alkohol. [4]

1.5 Legislatíva vlastnej destilácie alkoholu

Právne aspekty ohľadne úpravy kvasného liehu sú pre bežného človeka značne komplikované a až neprehľadné. Prakticky je zákonom znemožnené si jednoducho čo i len pre vlastnú spotrebu upraviť aj minimálne množstvo alkoholu. Podľa zákona sa však nejedná už o trestný čin, ale naďalej ide o priestupok. Upravuje to zákon č. 61/1997 Sb., o lihu.

V tomto zákone spadá úprava liehu, teda jeho zušľachtovanie destiláciou a macerovanie parami pod pôsobnosť zvláštnych liehovarov. K výkonu tejto činnosti je potrebné splniť podmienky, ktoré rovnako upravuje zákon č. 61/1997 Sb., o lihu. Sú nimi získanie koncesovanej živnosti, ktorej predmetom je: "Výroba a úprava kvasného liehu, konzumného liehu, lihovin a ostatných alkoholických nápojů (s výjimkou piva, ovocných vín, ostatných vín a medoviny a ovocných destilátů získaných pěstiteľským pálením) a prodej kvasného liehu, konzumného liehu a lihovin", podľa zákona č. 455/1991 Sb, o živnostenskom podnikaní. Podmienkami jej získania je náležité vzdelanie v odbore a to buď vysokoškolské vzdelanie vo vymedzených štúdiijných programoch, alebo vyššie odborné vzdelanie vo vymedzených oboroch a 3 roky praxe, alebo osvedčenie o rekválifikácii, prípadne iný doklad o odbornej kvalifikácii rovnako s praxou minimálne v dĺžke 3 roky. Mimo tieto podmienky splnenia pridelenia koncesovanej živnosti je nutné doložiť k žiadosti aj popis a náčrt usporiadania výrobného zariadenia, technickú dokumentáciu a doklad o vlastníckom alebo užívacom práve k prevádzke, kde bude výrobné zariadenie umiestnené. Samotné výrobné zariadenie musí byť certifikované a spĺňať podmienky dané §5 zákone o lihu.

Mimo tieto náležitosti pre získanie povolenia je nutné podľa §16 zákona o lihu splniť aj oznamovaciu povinnosť pred zahájením výroby správcovi dane. To najneskôr 15 dní pred zahájením výroby.

2 Rozbor použitých komponentov a súčastí

Nadchádzajúca kapitola sa zaoberá výberom jednotlivých komponentov pre následné vytvorenie automatizovanej destilačnej kolony. Porovnaním dostupných možností pre osadenie do výsledného zariadenia s ohľadom na splnenie požadovaných parametrov.

V rámci zadania diplomovej práce je riešený návrh malej destilačnej kolony doplnený o chladenie vody v uzavretom okruhu. Celá elektronika bude integrovaná na vlastných návrhoch DPS.

2.1 Kolona

Srdcom pre celú prácu je výber správnej destilačnej kolony. Jej výber nemožno podceňovať. Pre potreby práce je potrebné zvoliť cenovo dostupnú stolnú verziu. To znamená s objemom kotla 3-10l. Nemenej podstatnou požiadavkou je, aby bola modifikovateľná. S možnosťou pomerne jednoducho aplikovať vlastné úpravy a riešenia zabezpečujúce automatizáciu destilačného procesu.

V kategórii malých zariadení je výber pre potreby tejto práce s ohľadom na požiadavky značne obmedzený. V následnom porovnaní je výber troch zariadení dostupných na trhu.

DESTYLEX

Ide o veľmi jednoduchý prístroj. Jeho časťami sú tlakový hrniec a externý chladič. Celá konštrukcia je z nehrdzavejúcej ocele, čo zabezpečuje ľahkú starostlivosť s čistením. Pri objeme kotla 5l dokonale spĺňa nami požadovaný limit. Po stránke nárokov z pohľadu zásad pre destilačnú kolonu na alkohol má niekoľko nedostatkov. Sú nimi tenká vzostupná trubica prestupníku, ktorá bude mať za následok zvýšený spätný tok. Okrem toho aj nízko umiestnený teplomer, ktorý sa nenachádza v najvyššom bode, ktoré pary dosahujú. [2]

Výhody

- cena
- jednoduchosť
- nehrdzavejúca oceľ
- objem 5l

Nevýhody

- úzka trubica prestupníku
- umiestnenie teplomeru

Royal catering

Rovnako ako predchádzajúci destilačný prístroj DESTYLEX zdieľa výhody v podobe materiálu, z ktorého je vyrobený. Ide tiež o nehrdzavejúcu oceľ. Konštrukciou



Obr. 2.1: Destilátor DESTYLEX [2]

ide o klasický Pot-still ako pri všetkých porovnávaných zariadeniach. Výhodou je však širší prestupník. Ten smeruje rovno do chladiča. Spolu s ním je integrovaný na klobúku kotla do jedného celku. Nadobúda tak kompaktný dizajn, kedy celá konštrukcia tvorí jeden samostatne stojaci celok. Oproti prvej kolone má však vyššiu cenu, zato však kvalitnejšie spracovanie. Objemom je na hornej hranici výberového limitu. Okrem štandardných hadíc pre pripojenie chladiaceho okruhu nachádza okrem iného aj odmerný valec a liehomer. [10]



Obr. 2.2: Destilátor Royal dating RCAD10 [10]

Výhody

- kompaktnosť
- funkčná konštrukcia
- nehrdzavejúca oceľ
- kompletne príslušenstvo

Nevýhody

- cena
- objem 10l

Iberian Copper

Poslednou zvažovanou kolonou je celomedená zostava. Vyrába sa v širokom spektre objemov, od 1l až do 500l. Tvarmi odkazuje na originálne Moonshine kolony. Výhody medi nie sú však tak výrazné, aby v dnešnej dobe obstáli proti nehrdzavejúcej oceli. Jednoducho ju je možno nahradiť reakčným členom s medeným filtrom so zachovaním ostatných výhod. Konštrukčne nevykazuje žiadne zásadné nedostatky. Cenovo sa objemy 5l a 10l pohybujú blízko predchádzajúcemu modelu od Royal catering. [7]



Obr. 2.3: Destilačná kolona Iberian Copper 2,5l [7]

Výhody

- originálny vzhľad
- dokonalá konštrukcia
- veľké množstvo objemov

Nevýhody

- cena
- medená

K účelom práce bola po zvážení vybraná kolona od spoločnosti Royal catering. Ako hlavný bod zavážila jej integrovaná konštrukcia, kedy ide o jeden celok pevne spojeného klobúku a chladiča postaveného na kotle. O niečo väčší objem ako plánovaný má následne nespornú výhodu v dokonalejšom oddelení jednotlivých frakcií.

2.2 Varič

V prípade ohrevu kotla je možné využiť jediné riešenie a tým je elektrický ohrev. Bežne používaný ohrev plynom, ktorý je lacnejší v úvahu nepripadá kvôli nebezpečnosti jeho úniku pri manipulácii a zapájaní.

Z bežne dostupných elektrických varičov je možné použiť s liatinovou varnou doskou, alebo indukčný varič. Vďaka liatinovej varnej doske je prenos tepla do kotla destilačnej kolony pozvoľný. Tým pádom nie sú nadmerne prehrievané jeho steny a hrozí menšie pripalovanie ako v prípade indukčnej verzie. V prospech liatinovej verzie je aj skutočnosť, že sú omnoho lacnejšie. Bežne tretinu ceny oproti indukčnej varnej doske.



Obr. 2.4: Elektrický varič [12]

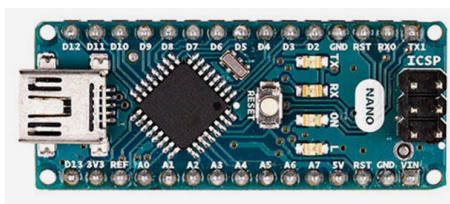
2.3 Kontrolér

Zvolenou platformou pre realizáciu prezentácie algoritmu ovládania a riadenia destilačnej kolony bolo Arduino, nakoľko nie sú očakávané žiadne výkonovo náročné operácie. Potrebné je zamerať sa na dostatočnú portovú vybavenosť. Pre hlavnú jednotku bolo zvolené Arduino Mega, ktoré v sebe implementuje dostatočný počet IO rozhraní a 4 hardwarové UART z čoho 3 budú využité na komunikáciu s PC, s jednotkou chladienia a pre Wi-Fi modul.

Chladiaca jednotka bude využívať Arduino Nano. To je založené na mikrokontroléri Atmel Atmega ATmega328P. Disponuje 22 digitálnymi a 8 analógovými IO pinmi.

2.4 Senzory

Predpokladom pre úspešnú reguláciu zariadenia je zvolenie správnych senzorov snímajúcich priebeh destilácie. Prvou hodnotou, ktorú treba poznať je teplota pár. Výmenou bimetalového teplomeru za niektoré z dostupných teplotných čidiel bude mikrokontrolér poznať, v ktorej fáze destilácie sa nachádza.



Obr. 2.5: Arduino Nano, [1]

Pre reguláciu výkonu ohrevu však samotná znalosť teploty nie je výpovedná. Výkon je riadený podľa rýchlosti, ktorou vytekajú z kondenzované pary z chladiča. Ponúkajú sa tu dve možnosti. Sú nimi prietokomer, alebo váha na ktorej je postavená zberná nádoba. Očakávané sú veľmi malé prietoky a presnejšie hodnoty je možné získať prostredníctvom váhy. A to po prepočítaní príbytku váhy za časový úsek na prietok.

2.4.1 Teplotné čidlo

Poznať presnú teplotu pár počas destilácie je základným predpokladom pre presné riadenie tohto procesu. Pretože na základe tejto teploty dokážeme určiť, aká frakcia je v ten moment destilovaná. Mimo pasívny termistor, ktorého meniaci sa odpor je potrebné vhodným spôsobom spracovať môže byť použitý na snímanie teploty integrovaná teplotná sonda.

Termistor NTC

Pre jednoduché a rýchle zmeranie teploty je najvhodnejší NTC termistor. Zmenou jeho teploty sa mení jeho odpor a zo znalosti krivky priebehu odporu v závislosti na teplote dokážeme zmerať odpor prepočítať na teplotu.

Odpor je však potrebné merať nepriamou metódou a to najjednoduchšie pomocou odporového deliča so známym odporom, kde meriame napätie tohto deliča podľa vzorca:

$$R_{NTC} = R \cdot \frac{U_{Vcc}}{U_{NTC}} [\Omega] \quad (2.1)$$

Teplotná sonda DS18B20

Táto integrovaná teplotná sonda disponuje nastaviteľným rozlíšením 9-12 b. Jej presnosť sa pohybuje v rozmedzí $\pm 0,5^\circ\text{C}$ pri teplotách -10°C až 85°C a maximálna mieraná teplota až 125°C . Pre svoje fungovanie nepotrebuje žiadne externé súčiastky mimo jedného rezistoru.

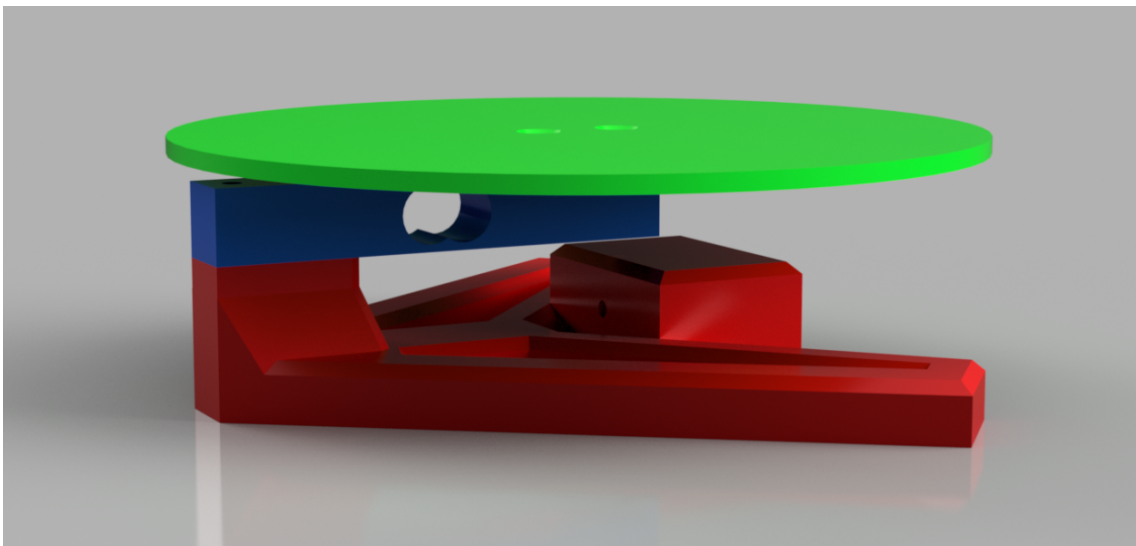
V trubičkovom prevedení je možné originálny bimetalový teplomer dodávaný spolu s destilačnou kolonou nahradiť týmto digitálnym sensorom. [9]

2.4.2 Váha

Pre sledovanie postupu, akým destilát kondenzuje a opúšťa chladič bolo zvolené nepriame meranie. Tým je použitie váhy pod zbernou nádobou a meranie jej hmotnosti. Maximálne merané objemy budú zhruba 2l. To s rezervou pre váhu zbernej nádoby 1 kg dáva požadované zaťaženie váhy 3 kg. Na obrázku 2.6 je zobrazený render konštrukcie váhy. Počítačový návrh je potrebný pre jeho vytlačenie 3D tlačiarňou. Skladá sa z troch častí. Prvou časťou je hlavná plocha, s priemerom 12 cm, na ktorú je možné umiestniť zbernú nádobu. Druhou časťou je základňa nesúca tenzometer so schránkou pre DPS osadený ADC. Je umiestnený čo najbližšie tenzometru, aby sa eliminoval vplyv rušenia na presnosť merania. Táto schránka je uzavretá krytkou.

Tenzometer YZC-131

Senzorom pre meranie bol zvolený tenzometer YZC-131A. Prevádza vyvinutý tlak na jeho voľnom konci na napätie. Využíva zapojenie do Wheatstonovho mostíka. Po jeho pripojení na napájacie napätie spôsobí zaťaženie voľného konca rozváženie napätia na jeho meracích vodičoch. Zmena napätia je však veľmi malá a nemožno ju priamo spracovať mikrokontrolérom. Je nutné pre prevod jeho výstupu použiť ADC. Rozsah bol zvolený do 3kg kvôli dostatočnej rezerve zaťažiteľnosti a nie príliš veľkej chybe v presnosti merania malých váh. [16]



Obr. 2.6: Návrh váhy

AD prevodník

Z dôvodu malého rozlíšenia prevodníku na analógových vstupoch mikrokontroléru, ktoré je iba 10 b, čo zodpovedá 1024 hodnotám, je potrebné použiť na snímanie hodnoty externý modul. Pre použitie so zvoleným sensorom je v zapojení použitý obvod HX711. Ponúka 2 vstupné kanály. Jeden so zosilnením 32 a druhý so zosilnením 64, alebo 128. Pri napájacom napätí 5V a pri maximálnom zosilnení je merací rozsah ± 20 mV. Komunikácia prebieha prostredníctvom sériovej linky. Pri každej nábežnej hrane na pine SCK sa z prevodníku vyčíta postupne 24 b hodnota zmeraného napätia zakódovaná v dvojkovom doplnkovom formáte začínajúcim MSB. [17]

2.5 Akčné členy

Akčnými členmi, ktoré riadia výkonové funkcie v zapojení destilačnej kolony je spínanie variču a spínanie ventilátorov spolu s vodnou pumpou, kde ide o spínanie prvkov s napájacím napätím 12 V.

2.5.1 Spínanie variču

Pre spínanie zvolenej varnej dosky s výkonom 1500 W pri 230V je potrebné, aby spínací prvok zvládol prúdy minimálne 7 A, ktoré zvolený varič pri maximálnom výkone odoberá z elektrickej siete. Metódou pre reguláciu výkonu bolo pre jednoduchosť s použitým riadením pomocou mikrokontroléru zvolené PWM. Tepelná kapacita liatinovej dosky variča pri vhodne zvolenej perióde zabezpečí plynulé vyžarovanie tepla.

Zvoliť treba spínací prvok s dostatočne vysokou životnosťou pre zvládnutie potrebných spínacích cyklov. Rovnako podstatným parametrom je spínacie napätie a prúd. Ovládacie napätie by malo byť 5V, aby nebolo potrebné v zapojení používať viacero napájacích napätí.

Relé

Prvou možnosťou, ktorá prišla ako vhodná voľba bolo elektromagnetické relé. Jeho relatívne malá mechanická odolnosť však zamedzuje možnosť jeho použitia v návrhu. Konkrétne porovnávaný model udáva životnosť 100 000 cyklov. Pri použití periódy 5s dáva výslednú životnosť 139 hodín. Je to spôsobené vytváraním elektrického oblúku pri odpájaní kontaktov. [6]

Polovodičové relé

Eliminovať vplyv mechanickej životnosti je možné pomocou elektronického spínacieho prvku, napríklad SSR. Neobsahuje vo svojom zapojení žiadne mechanické časti a jeho počet spínacích cyklov je dostatočný na to, aby bolo možné ho považovať za neobmedzený. Nevýhoda s ním spojená je však v potrebe jeho chladenia v dôsledku úbytku napätia na spínacom triaku.

Typ	Model	U AC [V]	I [A]	P [VA]	Cykly [$\times 10^3$]
Relé	Finder 36.11.9	250	10	2500	100
SSR	COSMO KSD425AC8	280	25	-	-

Tab. 2.1: Porovnanie spínacích prvkov [6]

Z dôvodu veľkého opakovania spínacích cyklov nie je možné použiť elektromagnetické relé. Použitie je polovodičové relé s dostatočne dimenzovaným maximálnym prúdom a pasívnym chladením na hliníkovom chladiči.

2.5.2 Spínanie malých napätí

Prvok starajúci sa o spínanie výkonových prvkov s malým napätím bolo zvolené tranzistorové pole ULN. Konkrétne ty ULN2003 v púzdre SO-16. Je možno ho riadiť 5 V signálom na vstupnom pine a jeho výstup dokáže spínať záťaž o hodnote 0,5 A až do 50 V

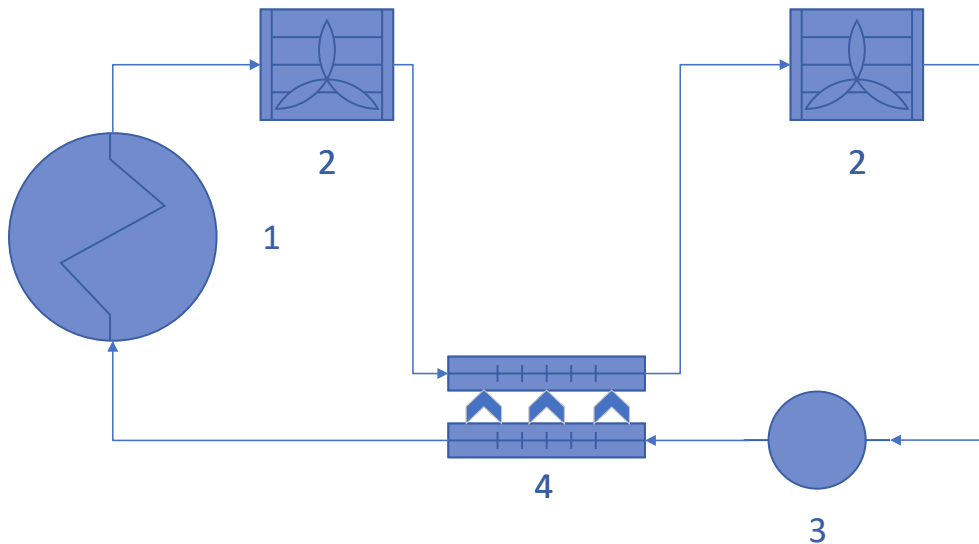
2.6 Chladenie

Pri testovacom zapojení a skúškach destilácie bolo použité chladenie priamo studenou vodou z vodovodu. Takýto spôsob chladenia je značne nevhodný, z dôvodu plytvania vody. Druhou nevýhodou je potreba prevádzkovať zariadenie v blízkosti vodovodu. Spotreba vody je však cca 10l/h. S takýmto prietokom sa voda o teplote 10 °C, ktorá vstupovala do systému ohriala na zhruba 45-50 °C.

Tento problém je možné vyriešiť uzavretým okruhom vodného chladenia. Ponúka sa možnosť použiť na odoberanie tepla z vody peltierov článok, ktorý pri privedení napätia jednu stranu ochladzuje a druhá je zohrievaná. Dochádza teda k výmene tepelnej energie medzi jeho plochami. Bol navrhnutý okruh chladenia, využívajúci dva vodné bloky, medzi ktorými bude peltierov článok umiestnený.

Na obrázku 2.7, symbol číslo 1 reprezentuje chladič destilačnej kolony. V ňom je voda zohrievaná a postupuje do prvého vodného radiátora č. 2, kde sa schladí.

Z neho prúdi ďalej do teplej časti vodného bloku s peltierovým článkom, s označením ako č. 4. Následne postupuje do druhého vodného radiátora a cez vodnú pumpu č. 3. Pumpa je pripojená ku chladnej strane vodného bloku, kde je možné schladiť vodu pod úroveň teploty okolitého vzduchu. Vo vhodnej pozícii bude v okruhu umiestnená expanzná nádoba.



Obr. 2.7: Chladiaci okruh

2.7 Vstupno-výstupné zariadenia

Zariadenie musí byť schopné komunikovať s užívateľom. K tomu sú určené užívateľské ovládacie prvky a zobrazovacie zariadenie. Okrem nich disponuje prototypové zapojenie USB konektorom priamo na DPS s mikročipom, ktoré sériovou linkou zdieľa procesné informácie.

Ovládanie zariadenia je možné realizovať mikrosplínačmi. Tie následne vykonávajú dostupné príkazy. Pre zefektívnenie ovládania užívateľom je použitý rotačný enkóder. Ten namiesto stláčania tlačidiel ponúka pohodlnejší spôsob zmeny hodnôt pomocou rotácie hmatníku. Umožňuje okrem toho aj funkciu stlačenia, napríklad pre potvrdenie.

2.7.1 Displej

Potrebný výstup pre zobrazenie informácií smerom k užívateľovi môže zabezpečiť displej. Alfamerický displej zobrazuje v jednotlivých poliach znaky. Bola zvolená varianta s integrovaným radičom. Takáto kombinácia umožňuje zredukovať počet použitých pinov mikrokontroléru zo 6 na 2 vďaka použitiu I2C zbernice.

Dostupný je v mnoho variantách počtu znakov na riadok a riadkov. Ideálnou variantou medzi veľkosťou a kompaktnosťou je modul s rozmerom 20 znakov a štyrmi riadkami.

3 Konštrukcia destilačnej kolony

V tejto kapitole budú zhrnuté výsledky, ktoré boli dosiahnuté počas práce na konštrukcii zariadenia. Okrem toho je v kapitole obsiahnuté aj predstavenie programového riešenia.



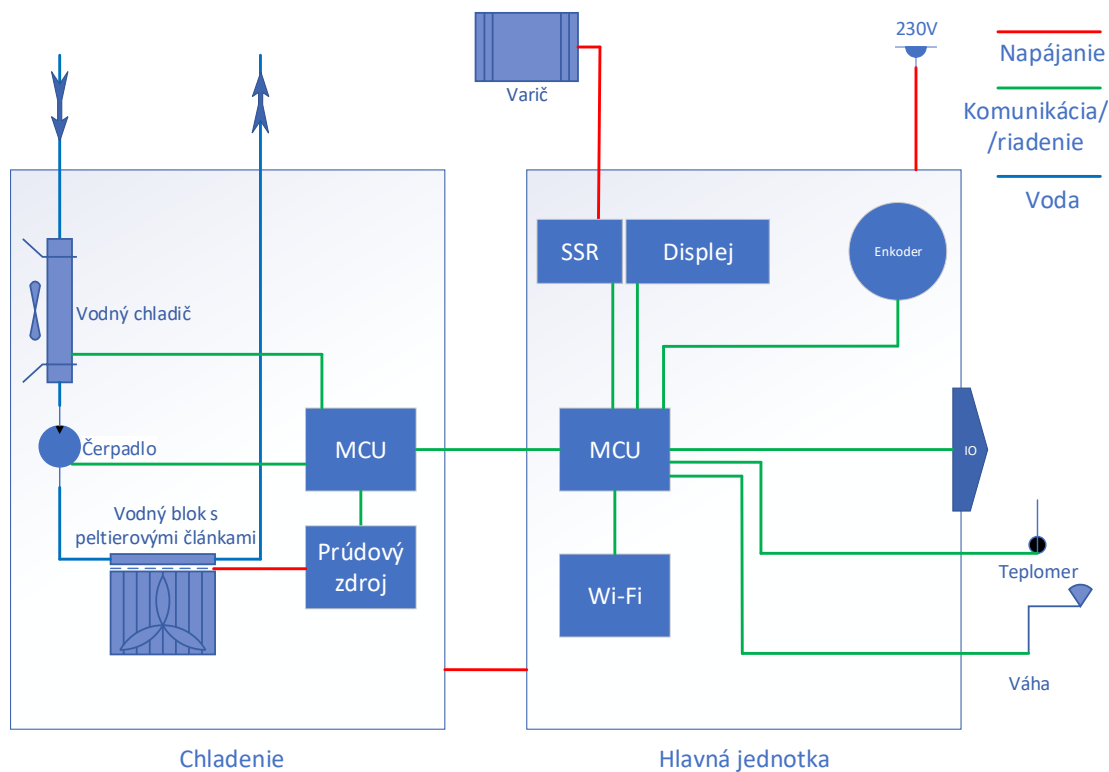
Obr. 3.1: Zapojenie destilačnej kolony a prídavnej chladiacej jednotky

3.1 Návrh

Ako bolo spomenuté už vyššie, pri návrhu konečnej podoby destilačnej kolony bolo cieľené v prvom rade na jej prenositeľnosť. Tomu podlieha aj rozdelenie funkčných celkov na dva bloky. Sú nimi jednotka riadenia, ktorá v sebe implementuje celú logiku ovládania a riadenia. Ku nej sú pripájané vonkajšie senzory potrebné k sledovaniu priebehu destilácie ako váha a teplomer.

Druhým blokom je chladiaca jednotka. Pozostáva rovnako z riadiaceho obvodu sledujúceho aktuálne hodnoty chladenia akými sú teplota pretekajúcej vody a nastavenie výkonu peltierových článkov. Tieto hodnoty pomocou sériovej linky posiela do hlavnej jednotky, kde môžu byť vypísané užívateľovi.

Na blokovej schéme 3.2 je možné si prehliadnúť nákres zapojenia oboch celkov destilačnej kolony. Pre jednoduchšie zapojenie je napájacie napätie z elektrickej zásuvky privedené do hlavnej jednotky. Na nej je umiestnená spínaná zásuvka, do



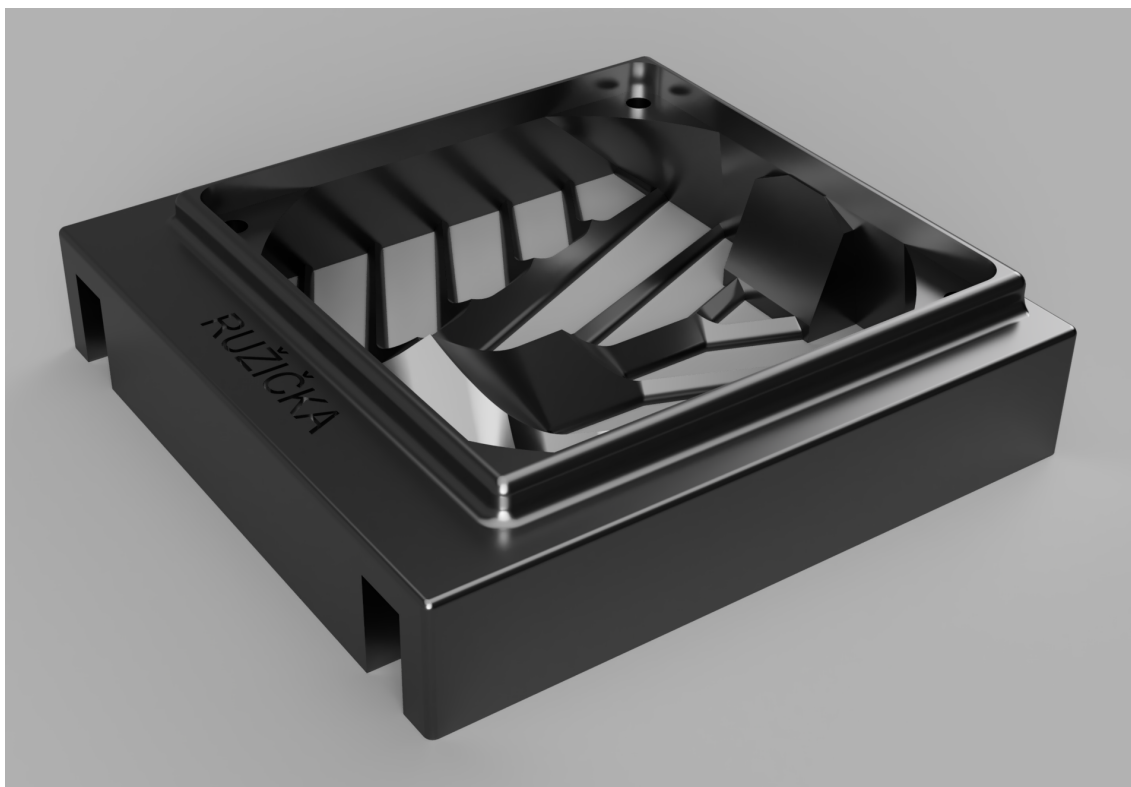
Obr. 3.2: Blokovaná schéma zapojenia

ktorej je možné zapojiť varič a druhá zásuvka priamo spojená so vstupom, ktorá je určená pre pripojenie chladiacej jednotky.

Senzory ako váha a teplomer sú ku hlavnej jednotke pripájané pomocou konektora RJ-11, ktorý mimo komunikácie so senzormi pre ne poskytuje aj napájacie napätie 5 V. Displej, rotačný enkóder a spínanie SSR sú k plošnému spoju pripojené pomocou konektora so zámkom. Pre zabezpečenie čo najjednoduchšej konštrukcie pri výrobe je doska plošného spoju koncipovaná ako shield pre Arduino Mega.

Do jednotky chladienia mimo napájanie z hlavnej jednotky je privedená aj sériová linka. Slúži na komunikáciu medzi nimi. Rovnako je tiež plošný spoj navrhnutý ako shield pre Arduino Nano. Sú pomocou neho spínané všetky ventilátory, snímané teploty z NTC článkov a riadený zdroj pre napájanie peltierových článkov.

Koncepcia zapojenia vodného okruhu však oproti pôvodnému návrhu bola vzhľadom na zvýšenie počtu peltierových článkov zjednodušená na chladienie ich teplej strany pomocou hliníkových chladičov o rozmere 100x100 mm a dĺžke 120 mm s ventilátormi na upínacej redukcií.



Obr. 3.3: Upínacia redukcia na chladič

3.1.1 Hlavná jednotka

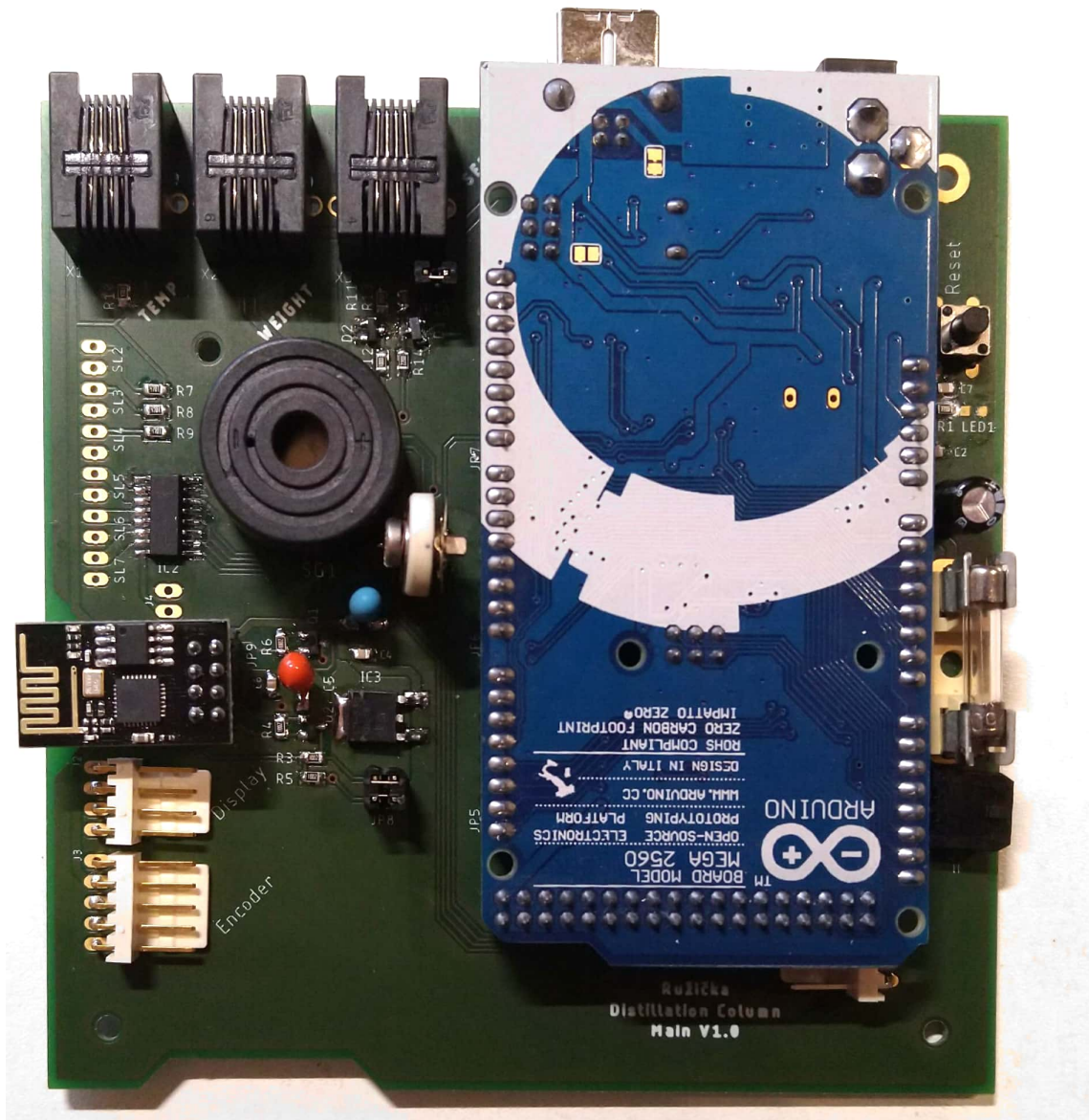
Úlohou hlavnej jednotky je snímať hodnoty zo senzorov, vhodne ich spracovať a následne riadiť proces destilácie. Mimo to zabezpečuje aj interakciu s užívateľom. Na displeji zobrazuje potrebné informácie a pomocou rotačného enkóderu je umožnené jej ovládanie.

Napájaná je pomocou jedného napätia 5V z modulového zdroju. Napätie 3,3V pre napájanie Wi-Fi modulu je získané z meniču na vlastnej DPS, pretože menič obsiahnutý priamo na doske Arduina nedisponuje dostatočnou prúdovou zaťažiteľnosťou. Wi-Fi konektivitu obstaráva kontrolér ESP8233 v podobe modulu ESP-01, ktorý je vybavený plnou podporou pre komunikáciu na sieťovej vrstve a podporuje protokol HTTP ako v podobe klienta, tak aj serveru.

Ako bolo napísané vyššie, tak externé senzory sú ku doske pripájané konektormi RJ-11. Rovnako aj sériová linka ku chladiacej jednotke. Pri nej je však možné zvoliť jumprom, či má byť pomocou tohto káblu aj napájané jej riadenie. Pre upozornenie obsluhy na naliehavé incidenty slúži piezomenič. Akustické signály sú omnoho jednoduchšie zaznamenateľné, aj v prípade ak obsluha aktívne nesleduje priebeh destilácie. Hlasitosť sa nastavuje ručne trimrom. Doplnenie tejto funkcie bolo už

mnohokrát prínosné.

Plošný spoj disponuje aj predpripravenými konektormi pre digitálny vstup a výstup 5V zaťažiteľný až do 0,5 A vďaka posilneniu Darlingtonovým polom ULN2003. Tieto prípadné zariadenia môžu byť dodatočne pripojené, ak sa ich využitie doplní vo firmwari. Spínacie SSR pre varič je kvôli jeho výkonovým stratám chladené pasívnym chladičom.



Obr. 3.4: Doska plošného spoju riadenia destilačnej kolony

3.1.2 Chladiaca jednotka

Druhou jednotkou v návrhu destilačnej kolony je chladenie. Rovnako ako hlavná jednotka je postavená na vlastnom návrhu plošného spoju. Napájacím napätím je však 12 V, kvôli potrebe napájania ventilátorov. Napätie 5 V pre napájanie samotného kontroléru je získavané jeho vlastným meničom integrovaným na module Arduino Nano.

Spínanie ventilátorov a ostatných prvkov vyžadujúcich napätie 12 V obstaráva tranzistorové pole ULN2003. Pripojené ventilátory sú teda napájané priamo z dosky. NTC pre snímanie teploty v chladiacom okruhu sú pripojené na kolíkovú lištu, kde spolu s rezistorom voči napätiu tvoria odporový deliča a jeho napätie je merané analógovými vstupmi kontroléru.

Tieto teplotné snímače sú inštalované pomocou T spojok v troch častiach vodného okruhu. Prvý je priamo na vstupe radiátoru, kde je privádzaná teplá voda, druhý je za radiátorom pred expanznou nádobou. Posledný je na výstupe za vodnou pumpou a blokmi osadenými peltierovými článkami.

Napájanie peltierových článkov je realizované mimo DPS, pričom je použité zapojenie 8 ks s výkonom 89 W, po 4 články do série. Napájané sú prúdovým zdrojom s maximálnym napätím 30 V, pri ktorom je možné pomocou PWM regulovať prúdovú limitáciu. V prípade požiadavky úplného deaktivovania chladiacej funkcie je možno pomocou relé odpojiť tento zdroj od sieťového napätia. Respektíve jej aktivácia je podmienená spustením chladenia pomocou mikrokontroléru.

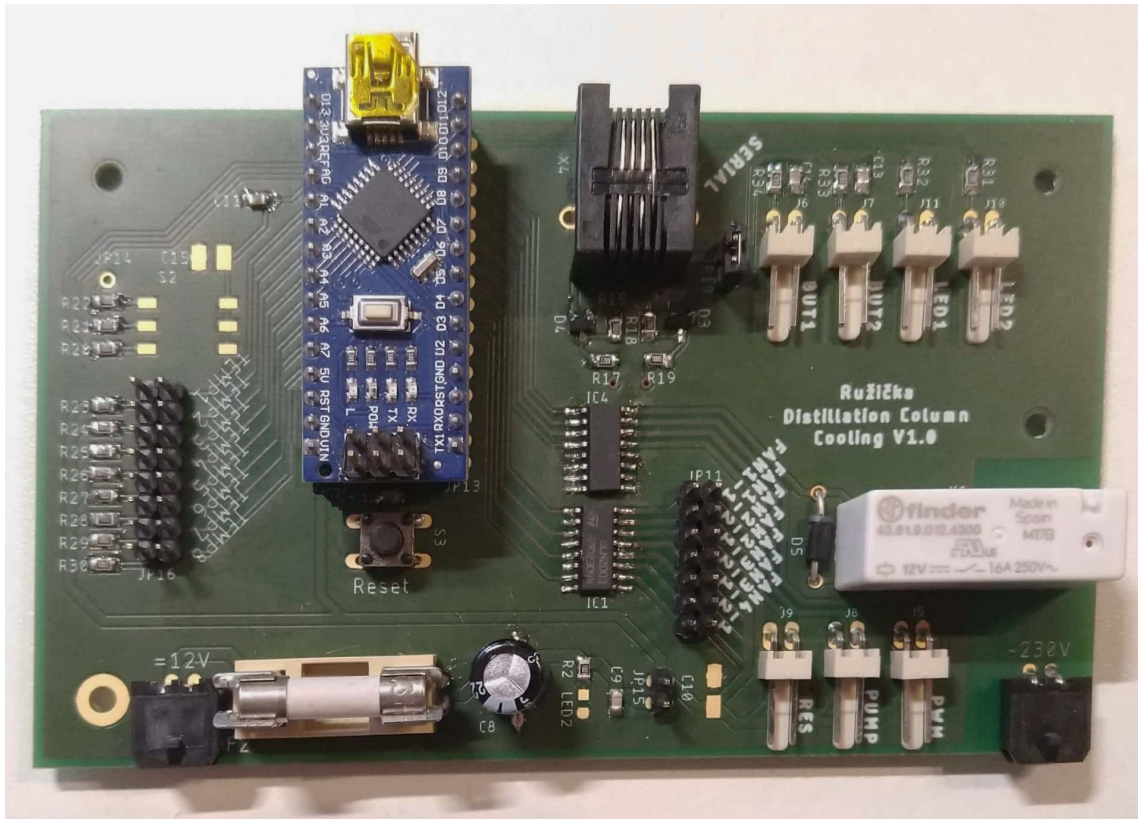
3.2 Popis ovládacieho rozhrania a funkcií

Kapitola popisuje softwarové riešenie ovládania a riadenia destilačnej kolony.

3.2.1 Ovládanie

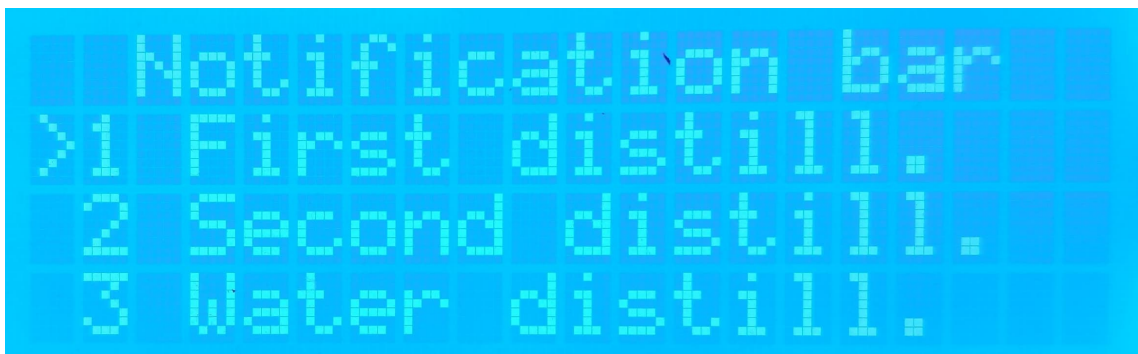
Po pripojení zariadenia k napájaniu sa na displeji zobrazí úvodné menu. Presun medzi jednotlivými položkami sa uskutočňuje rotáciou enkóderu. Rotácia vpravo presúva výber na nasledujúcu položku a naopak rotácia vľavo sa vracia na predchádzajúcu položku.

Využitie je aj tlačidlo v enkóderi, ktoré v sebe implementuje dve funkcie, krátkeho a dlhého stlačenia. Obecne naprieč celým programom pritom krátke stlačenie je funkciou výberu a dlhé stlačenie (nad 500 ms) krok späť. Prahová hodnota, ktorá značí rozdiel medzi krátkym a dlhým stlačením sa nastavuje priamo v kóde programu, kde je pevne nastavená definíciou.



Obr. 3.5: Doska plošného spoju chladiacej jednotky

Zobrazené položky v hlavnom menu sú prednastavené programy destilácie a poslednou položkou je vstup do nastavení. Nastavenie obsahuje možnosti, ktoré je možné meniť a tým prispôbiť alebo otestovať jednotlivé súčasti destilačnej kolony. Strom položiek je popísaný nižšie.

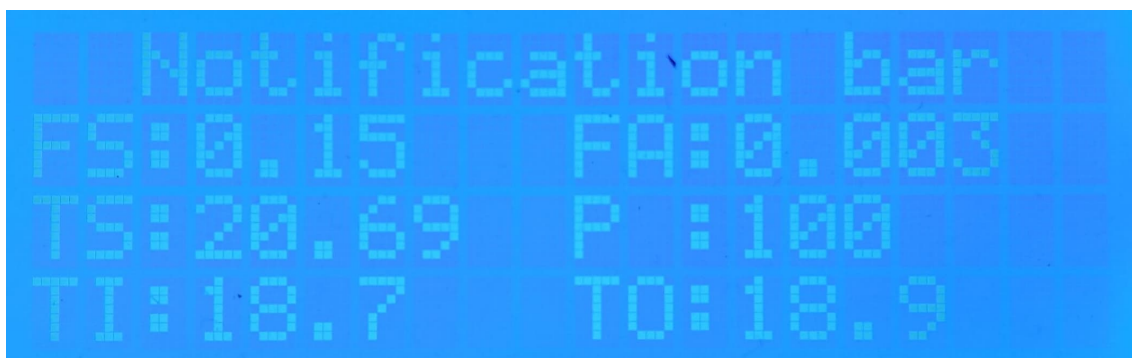


Obr. 3.6: Ukážka displeju v menu

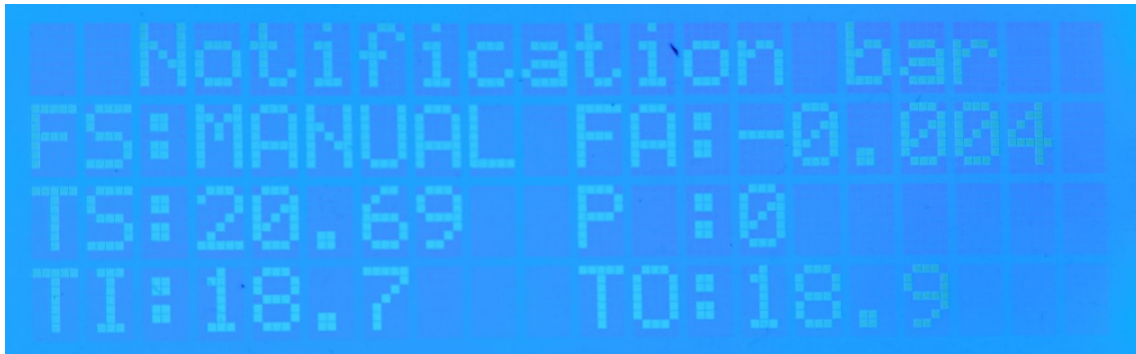
1. First distillation (ukončenie pri 98 °C)
2. Second distillation (ukončenie pri 94 °C)
3. Water distillation (ukončenie pri 101 °C)
4. Own 1 distillation (možnosť nastavenia vlastných parametrov destilácie)
5. Own 2 distillation (možnosť nastavenia vlastných parametrov destilácie)
6. Settings
 1. Wi-Fi
 1. Start HTTP (spustí testovací HTTP Server)
 2. Change SSID (zmena mena a hesla AP pre pripojenie)
 3. Check IP/MAC (zobrazí pridelenú IP adresu a MAC)
 4. Direct to USB (priamy spojenie medzi sériovou linkou ESP-01 modulu a PC)
 2. Sensor values (zobrazí aktuálne hodnoty senzorov)
 3. Collector size (nastavenie veľkosti zbernej nádoby)
 4. Weight reset (vynulovanie váhy)
 5. Weight calibration (kalibrácia váhy)
 6. Button test (test tlačidla)
 7. Values to USB (povoliť alebo zakázať výpis aktuálnych hodnôt do USB pre logovanie priebehu destilácie)

3.3 Funkcia destilácie

Primárnym účelom celého zariadenia je destilácia alkoholu. Preto ako prvou z popisovaných funkcií je táto. Jej vstupnými parametrami sú nastavenie konštánt P, I a D, potrebných pre ladenie regulácie. Ďalším vstupným parametrom je počet hodnôt v plávajúcom okne pre priemerovanie prietoku a konečná teplota pár, kedy je destilácia ukončená. Prietok je snímaný s periódou 5 s.



Obr. 3.7: Ukážka displeju počas destilácie v automatickom režime



Obr. 3.8: Ukážka displeju počas destilácie v manuálnom režime

Počas destilácie je na displeji zobrazených niekoľko najdôležitejších hodnôt obsluhu pre kontrolu destilácie. Sú nimi:

- FS (Flow Set) - nastavený prietok
- FA (Flow Actual) - aktuálny preitok
- TS (Temperature of Steam) - teplota pár destilátu
- P (Power) - aktuálny výkon variču
- TI (Temperature In) - teplota na vstupe do chladiacej jednotky
- TO (Temperature Out) - teplota na výstupe z chladiacej jednotky

Nastavenie požadovaného prietoku prebieha rotáciou enkóderu v kroku 0,01 g/s. Možno však stlačením hmatníku prejsť do manuálneho režimu. Vtedy je rotáciou menený výkon variču medzi dvoma hodnotami 0 a 100 %. O tejto skutočnosti je obsluha informovaná hláškou "MANUAL" v poli FS namiesto nastavenej hodnoty. Opätovným stlačením sa ukončí manuálny režim regulácie a nastaví sa rovnaký prietok ako bol posledný aktuálny pred vstupom do manuálneho režimu.

Nábeh výkonu je nastavený pozvoľna. Pri teplote pár do 60 °C je výkon variču bez regulácie (100 %). Po dosiahnutí tejto hodnoty sa výkon variču nastaví na 50 %. To trvá až do teploty 70 °C, kedy je ešte znížený výkon na 40 %. Tým je zabezpečený jemný nábeh teploty v jej kritickej fáze počas začiatku prvej frakcie.

Samotný PID regulátor preberá riadenie výkonu až v momente keď priemerný prietok za zvolenú dĺžku okna prekročí 0,05 g/s.

Výpis 3.1: Výpočet výkonu variču PID regulátorom

```
flowIntegral = flowIntegral + ((flowSet - flowAvg) * I); 1
    pwr = ((flowSet - flowAvg) * P) + 2
          ((flowAvgLast - flowAvg) * D) + 3
          flowIntegral; 4
```

Vo výpise 3.1 je uvedený výpočet potrebného výkonu variču pre udržanie nastaveného prietoku. Pozostáva z troch zložiek. Proporcionálna je počítaná ako rozdiel nastaveného prietoku a prietoku priemerného, zosilneného o konštantu P. Integrovaná zložka pred jej uplatnením inkrementuje samú seba o rozdiel nastaveného a priemerného prietoku zosilneného o konštantu I. Poslednou zložkou, ktorá je uplatňovaná v regulácií je derivačná. Operuje s rozdielom priemeru minulého a aktuálneho zosilneného o D konštantu. Zmenou konštant P, I a D je možné docieľiť požadovaný priebeh regulácie a vyladiť tak správanie variču pre rôzne percentné vstupné produkty destilácie. Pričom prvá destilácia je odladená na 10% zmes alkoholu a druhá destilácia na 15%.

Pravidelne prebieha aj kontrola aktuálnej hmotnosti na váhe, kedy je jej hodnota porovnávaná s nastavenou maximálnou váhou zbernej nádoby. Ak je prekročená táto hodnota, obsluhu destilačná kolona informuje akustickým signálom. Ten nie je možné nijak v ovládaní počas destilácie vypnúť. K jeho deaktivácii prichádza až vyprázdnením zbernej nádoby.

K ukončeniu destilácie dochádza po dosiahnutí hraničnej teploty pár. O tejto skutočnosti je obsluha informovaná hlásením na displeji. Druhou možnosťou ako destiláciu predčasne ukončiť je dlhé stlačenie hmatníku, kedy je tento zámer overený dodatočnou hláškou, ktorú je opäť potrebné potvrdiť dlhým stlačením. Krátke stlačenie znamená návrat k procesu destilácie.

3.4 Nastavenia

Posledná položka v zozname na úvodnej obrazovke po výbere jednotlivých destilácií sú možnosti nastavenia.

3.4.1 Wi-Fi

Výberom tejto položky v nastaveniach sa vykoná overenie prítomnosti a funkčnosti Wi-Fi modulu pomocou AT príkazov. Po úspešnom overení funkčného modulu sú sprístupnené ostatné možnosti. Jednotlivé položky nastavenia Wi-Fi boli uvedené v kapitole 3.2.1.

3.4.2 Kontrola senzorov

V tejto funkcii sa zobrazujú na displej aktuálne hodnoty snímané na senzoroach. Sú nimi teplota a váha. Zobrazovaný je aj prietok. Ten je meraný zo zmeny váhy v čase.

Prietok je počítaný v intervaloch 5 s a získaný z rozdielu zmeranej váhy na začiatku a konci periódy. Hodnoty prítoku ktoré sú väčšie ako 3 g/s a menšie ako -3 g/s

sú ingorované a nahradené predchádzajúcou hodnotou. Tým je zabránené zanášaniam chybných meraní napríklad v momente vyprázdňovania zbernej nádoby.



Obr. 3.9: Zobrazenie aktuálnych hodnôt senzorov

3.4.3 Veľkosť zbernej nádoby

Nastavením tejto hodnoty sa volí hmotnosť v g, ktorú pojme zberná nádoba. Treba pamätať však pri volení hodnoty na to, že prvé frakcie destilácie obsahujú vysokopercentný alkohol, ktorého hustota pri koncentracii okolo 80% je iba $0,8343 \text{ g/cm}^3$. Pred spustením destilácie sa odporúča pre správne fungovanie tejto funkcie vyresetovať váhu s umiestnenou prázdnu zbernou nádobou.

Požadovaná hmotnosť sa mení rotáciou hmatníku v kroku 10 g. Maximálna hodnota ktorú je možné nastaviť sa určuje premennou priamo v kóde, pre zamedzenie preťaženiú váhy, v závislosti na zvolenom tenzometri, čo je v našom prípade 3000 g. Minimálna hodnota je zadefinovaná rovnako a to na hranici 50 g.

Potvrdenie nastavenej hodnoty sa vykonáva krátkym stlačením hmatníku. Zvolená hodnota sa ukladá do pamäte a pri opätovnom zapnutí zariadenia sa počas destilácie uplatňuje uložená hodnota. Pokiaľ sa jedná o čerstvo napálený kontrolér, alebo chybné uloženie hodnoty, tak pokiaľ je načítaná hodnota z pamäte mimo rozsah 50-3000 g, je veľkosť zbernej nádoby počas inicializácie nastavená na 100 g.

3.4.4 Reset váhy

Vykoná zmeranie nulovej hodnoty váhy a bude použitá až do vypnutia zariadenia. Táto hodnota sa neukladá do pamäte.

3.4.5 Kalibrácia váhy

Rovnako ako reset váhy meria najskôr nulovú hodnotu váhy. Jej meranie je však podstatne presnejšie, keďže sa meria 10-násobné množstvo vzoriek.

Po vypočítaní nulovej hodnoty je obsluha na displeji požiadaná o polozenie daného závažia ako referencie. Je ponechaný čas 1 s po jeho položení na ustálenie hodnôt. Nasleduje opäť meranie 100 hodnôt. Vydelením rozdielu priemerov nulovej a zaťaženej váhy hmotnosťou závažia získame krok napätia snímaného ADC prevodníkom, ktoré prislúcha hmotnosti 1 g.

Obe tieto hodnoty ako nulové napätie a napätie na 1 g sú uložené do pamäte, vďaka čomu nie je potrebná kalibrácia po každom spustení zariadenia.

3.4.6 Test tlačidla

Zvolením tejto položky je možné testovať funkčnosť a správanie tlačidla v hmatníku enkóderu za využitia prerušení. Na displeji sa zobrazí, ak je tlačidlo stlačené. Po jeho uvoľnení vypíše čas po ktorý bolo stlačené.

3.4.7 Výpis aktuálnych hodnôt

Nastavuje príznak, ktorý povolí, alebo zakáže výpis aktuálnych hodnôt po sériovej linke skrz USB. Táto funkcia je užitočná napríklad pri ladení parametrov regulácie destilácie.

Rotáciou enkóderu sa na displeji volí či sa majú tieto hodnoty posielat, alebo nie. Krátkym stlačením sa zvolí vybraná hodnota, ktorá sa uloží do pamäte.

4 Merania a ladenie procesu destilácie

Táto posledná kapitola zahŕňa merania od začiatku a prvých pokusov s destiláciou alkoholu až k vyladeniu celého procesu riadenia pomocou vlastného hardwarového a softwarového riešenia destilačnej kolony. Rovnakou mierou je venovaný text aj dimenzovaniu a testom chladiacej jednotky.

4.1 Ladenie regulácie

Prvoradou úlohou bolo zautomatizovať proces samotnej regulácie destilácie na základe získaných poznatkov a jej následné ladenie k ideálnemu priebehu, vzhľadom na destilovaný produkt. Tretím programom regulácie, ktorý však z časovej náročnosti meraní nie je obsiahnutý v meraniach je destilácia vody, ktorá nie je nijak kritická na precíznosť riadenia a jej teplota pre ukončenie destilácie je nastavená na 101 °C.

4.1.1 Úvodné pokusy a overenie funkčnosti návrhu

Prvé meranie bolo zaznamenávané ručne. Išlo o prvú verziu softwaru a overenie samotnej funkčnosti prototypového zapojenia ešte svojho času na kontaktnom poli. Vždy každých 50 ml boli zaznamenané teplota a prietok. Každých 100 ml bol zmeraný obsah alkoholu vo výslednom destiláte. Túto tabuľku je možné si prehliadnuť v 4.1.

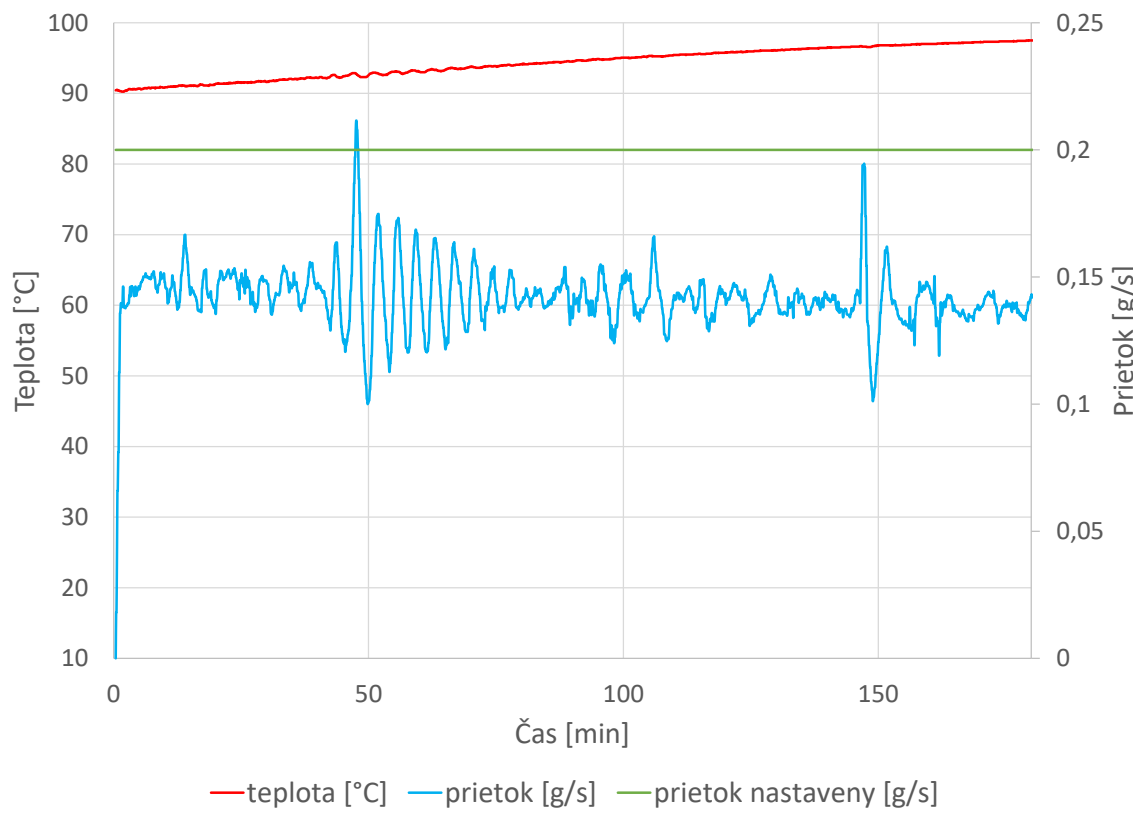
Boli overené teoretické poznatky o správaní sa destilačného zariadenia a zmenách veličín, ktoré je potrebné sledovať počas destilácie. Môžeme z tabuľky vidieť trend zvyšujúcej sa teploty, ako sa postupne znižuje koncentrácia alkoholu v kotle a rovnako aj v destiláte.

Destilačný program bol následne doplnený o výpis aktuálnych hodnôt sériovou linkou. Prichádzajúce hodnoty boli zaznamenávané a ukladané priamo do počítača. Ide o omnoho presnejšie meranie, keďže frekvencia výpisu bola každých 5 s a je možné vidieť presnejší záznam. Priebeh hodnôt aktuálneho a nastaveného prietoku destilátu sú zobrazené v grafe 4.2, spolu s teplotou pár pred vstupom do chladiču.

Záznam popisuje priebeh od času, kedy začala z destilačnej kolony tiecť prvá frakcia. Išlo o jednoduchý P regulátor, ktorého hlavnú nevýhodu je možné vidieť v čase 45 m, kedy nastal prudký rozkmit v regulácii. Trvanie tejto nestability bolo zhruba pol hodiny, než sa prietok naspäť ustálil. Druhým nedostatkom takto jednoduchého typu regulácie je jeho neschopnosť dosiahnuť nastavenej hodnoty, ale jeho ustálenie sa pod touto hodnotou.

Objem [ml]	Teplota [°C]	Obsah alk. [%]	prietok [g/s]	prietok nast. [g/s]
0	88,5			0,2
50	90,3		0,17	0,2
100	90,6	66	0,15	0,2
150	90,7		0,15	0,2
200	90,8	62	0,14	0,2
250	91		0,16	0,2
300	91,2	60	0,15	0,2
350	91,5		0,15	0,2
400	91,5	57	0,15	0,2
450	92,1		0,16	0,2
500	92,4	55	0,15	0,2
550	92,6		0,15	0,2
600	92,8	53	0,15	0,2
650	93,1		0,15	0,2
700	93,3	51	0,15	0,2
750	93,6		0,14	0,2
800	93,9	48	0,15	0,2
850	94,2		0,15	0,2
900	94,5	45	0,16	0,2
950	94,7		0,16	0,2
1000	94,9	42	0,15	0,2
1050	95,2		0,14	0,2
1100	95,4	39	0,15	0,2
1150	95,6		0,15	0,2
1200	95,8	37	0,15	0,2
1250	96		0,14	0,2
1300	96,2	34	0,14	0,2
1350	96,4		0,14	0,2
1400	96,6	32	0,14	0,2
1450	96,7		0,14	0,2
1500	97	26	0,14	0,2
1550	96,8		0,14	0,2
1600	97,2	24	0,14	0,2
1650	97,3		0,14	0,2
1700	97,4	22	0,14	0,2
1750	97,5		0,14	0,2
1800	97,6	22	0,14	0,2

Tab. 4.1: Záznam hodnôt destilácie 7,5l 10% vína

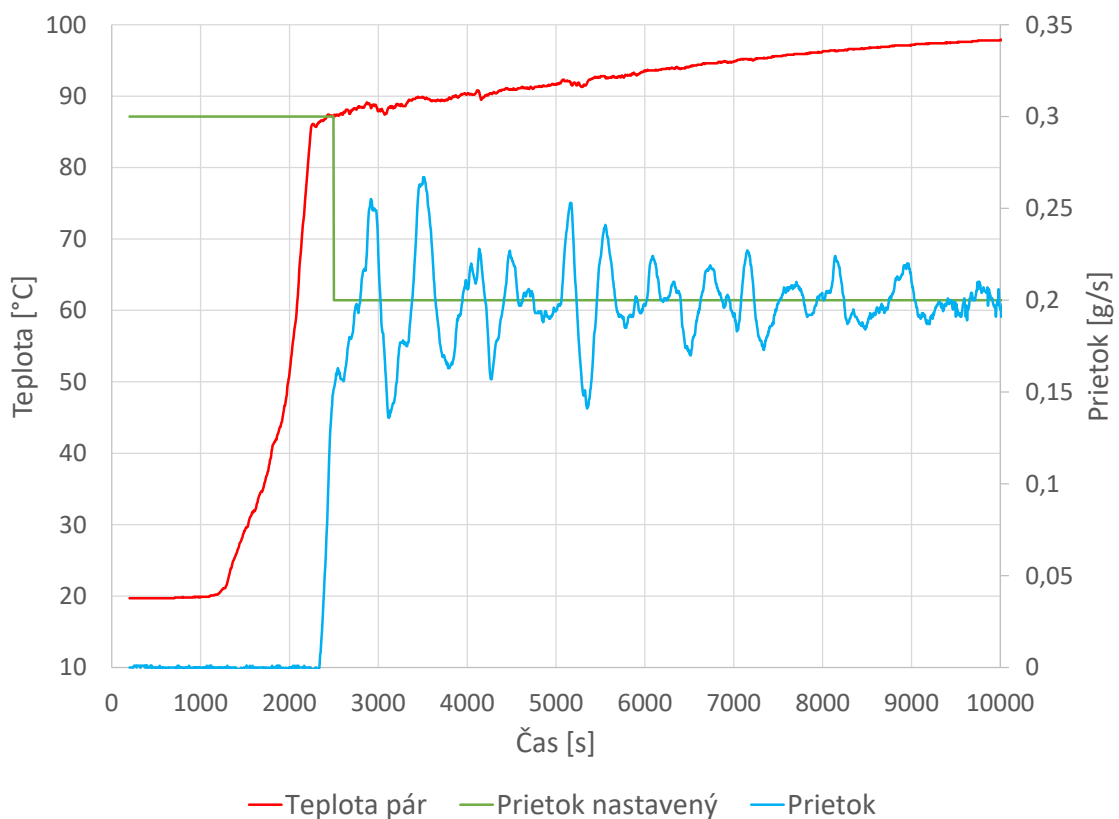


Obr. 4.1: Graf destilácie vína v závislosti na čase [s], prvá verzia riadenia

4.1.2 Prvá destilácia

Regulácia prvej destilácie je odladená na destiláciu vstupného produktu s obsahom alkoholu cca 10-15 %. To predstavuje napríklad víno, alebo bežný dobre prekvasený kvas. Graf 4.2 zobrazuje priebeh hodnôt počas destilácie 71 12 % vína. Záznam začína priamo od naplnenia kotlu vínom o izbovej teplote a končí zhruba po troch hodinách. Môžeme pozorovať kolísanie toku destilátu okolo nastavenej hodnoty. Teplota pre ukončenie destilácie je nastavená na 98 °C. Je vhodná na väčšie objemy vstupného produktu s možnosťou zberať dokvap a jeho následné využitie ako prídavok k nasledujúcej várke.

Priebeh je bez pravidelných zákmitov spôsobených reguláciou. Odstránenie kolísania možno doceliť precíznejším nastavením regulácie. Avšak jedná sa o univerzálne nastavenie regulácie, nie na konkrétny vstupný produkt, ktorý by mal vždy rovnaké vlastnosti. K tomu by bolo však potrebné aj nespočetne väčšie množstvo testov, kedy by sa menili koeficienty regulátora P, I, D a sledovala vplyv ich zmeny na výsledný prietok.



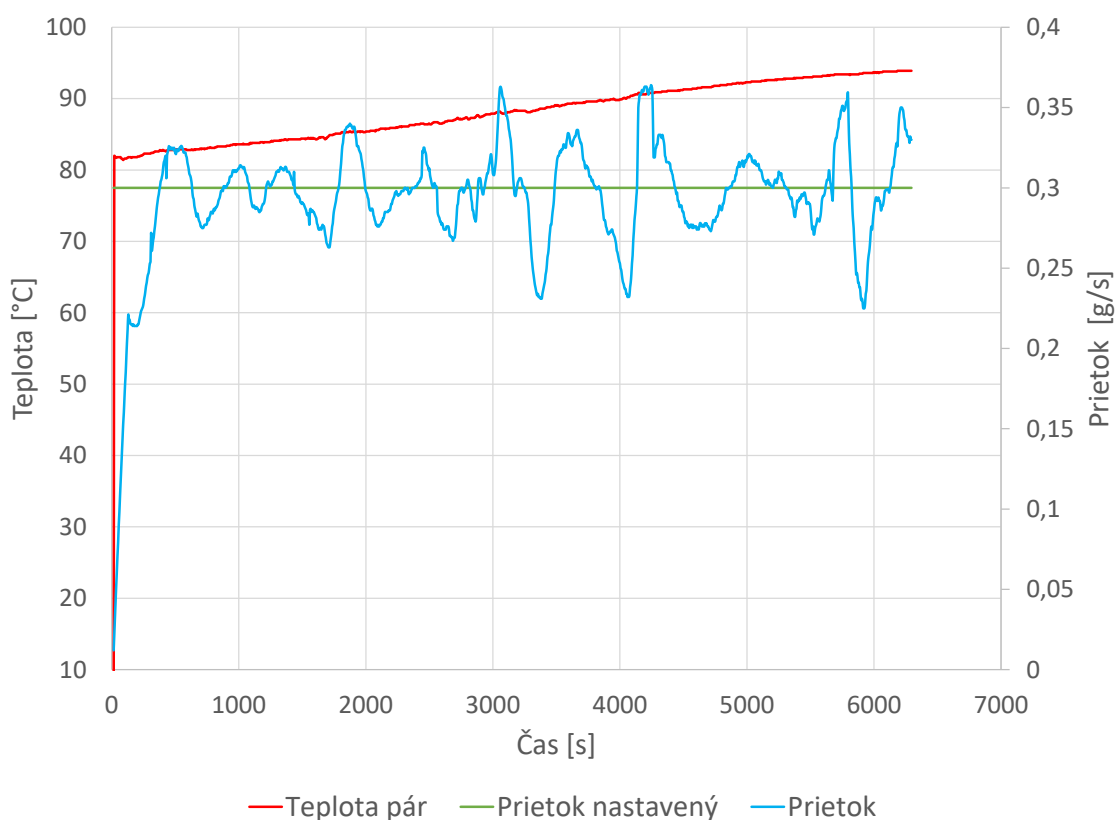
Obr. 4.2: Graf destilácie vína v závislosti na čase [s], verzia riadenia prvej destilácie

4.1.3 Druhá destilácia

Program druhej destilácie je uspošobený na vstupný produkt s vyšším percentom obsahu alkoholu. Typicky 15-20 %. Napríklad zmes potravinárskeho liehu a vody pre použitie ako roztoku pre macerovanie bylín. Možno použiť studenú cestu, ale aj macerovanie parami počas destilácie takéhoto roztoku.

Ladenie regulátoru pre tento program prebiehalo na roztoku s koncentráciou alkoholu 16 %. Je nastavený na jemnejší zásah oproti prvej destilácii zníženým P koeficientom oproti prvej destilácii a väčším D koeficientom. Ukončenie destilácie nastáva pri teplote pár v momente dosiahnutia 94 °C, čo je teplota v ktorej dosahuje aktuálny tok koncentráciu alkoholu okolo 20-30 % a začína frakcia dokvapú. Ten v tomto prípade už nebude destilovaný, čím sa ušetrí čas potrebný na destiláciu a spotrebovaná energia.

Nižšie je zobrazený graf 4.3 hodnôt z destilačnej kolony počas destilácie ginu. V kotli bolo nad úroveň hladiny umiestnené sito s bylinkami a koreninami pre docielenie typickej ginovej arómy. Rovnako, ako v predchádzajúcom prípade by si vyladenie regulácie vyžadovalo mnohonásobne viac testov a času.



Obr. 4.3: Graf destilácie ginu v závislosti na čase [s], verzia riadenia druhej destilácie

4.2 Chladienie

Začiatky s chladením prebiehali pokusmi na zapojení chladiaceho okruhu podľa návrhu zo schémy 2.7. Vzhľadom na 4 dostupné vodné bloky bolo možné použiť maximálne 4 kusy peltierových článkov. To sa ukázalo ako nedostatočné pre potreby destilačnej kolony. Bola následne zvolená koncepcia ako na blokovej schéme 3.2, čo dovoľovalo využiť až 8 peltierových článkov.

4.2.1 Porovnanie výkonnosti peltierových článkov

Prvým testom bolo stanovenie výkonnosti chladienia pomocou peltierových článkov priamo v zhotovenej chladiacej sústave. Cieľom bolo stanoviť vhodný počet článkov a určiť oblasť napájacieho napätia, v ktorej fungujú s čo najlepšou efektívnosťou vzhľadom na ich spotrebu.

Meranie prebiehalo bez zapojeného vodného radiátora na vstupe do chladiaceho okruhu, aby bola porovnávaná schopnosť chladienia samotných peltierových článkov osadených medzi vodnými blokmi. Teplá strana výmenníku bola chladená samostatným vodným okruhom. Pre zabezpečenie dokonalých styčných plôch boli kontaktné plochy vodných blokov vybrúsené brúsny papierom so zrnitosťou 2000 a následne vyleštené. Na styčné plochy bola nanosená teplovodivá pasta.

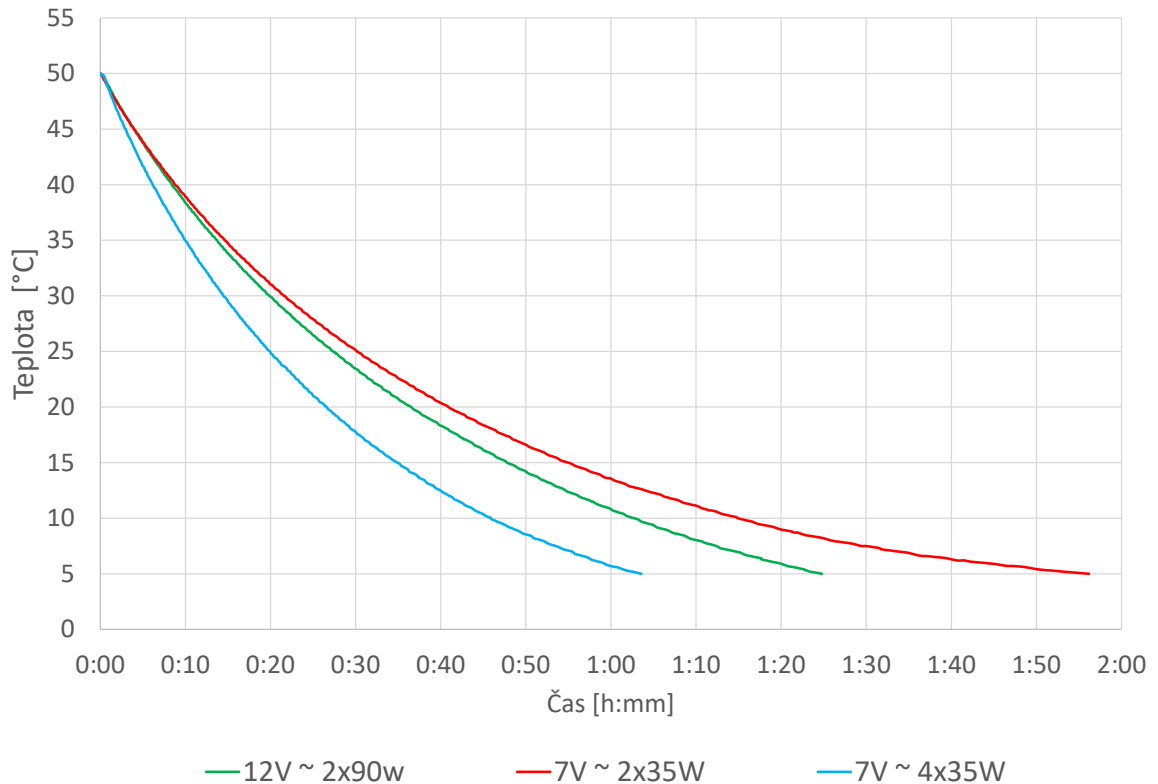
Čas [h:mm]	Príkon [W]	Články [ks]	Napätie U [V]	Spotreba [Wh]
0:45	360	4	12	240
1:05	140	4	7	151
1:25	180	2	12	225
1:55	70	2	7	134

Tab. 4.2: Tabuľka porovnania rôznych konfigurácií zapojenia chladienia

Hore uvedená tabuľka 4.2 porovnáva rôzne konfigurácie zapojenia peltierových článkov. Testované bolo schladenie vody z 50 °C na 5 °C cirkuláciou v nádobe o objeme 2l. Výmenník bol zložený z dvoch vodných blokov, medzi ktorými boli dva peltierove články. Pri konfigurácií 4 článkov sa jednalo o zapojenie výmenníkov do série.

Môžeme vidieť, že zvýšenie napájacieho napätia a rovnako aj zvýšenie počtu článkov zníži čas potrebný k dosiahnutiu stanovenej teploty. Zvýšenie počtu článkov so zachovaným napájacím napätím vykazuje približne rovnakú spotrebu energie iba s miernym navýšením pri väčšom počte článkov. Podstatnejšie navýšenie spotrebovanej energie nastalo so zvýšením napájacieho napätia, kedy podstatne klesá efektívnosť peltierových článkov.

Z toho dôvodu bola zvolená konfigurácia štyroch článkov zapojených do série napájaných napätím 30 V. Vo finálnej verzii chladenia dostačujúceho k destilačnej kolone sú použité dve takéto série na štyroch vodných blokoch, kde je teplá strana chladená hliníkovým chladičom a ochladzovaná prúdením vzduchu za pomoci ventilátorov.



Obr. 4.4: Porovnanie rôznych konfigurácií peltierových článkov

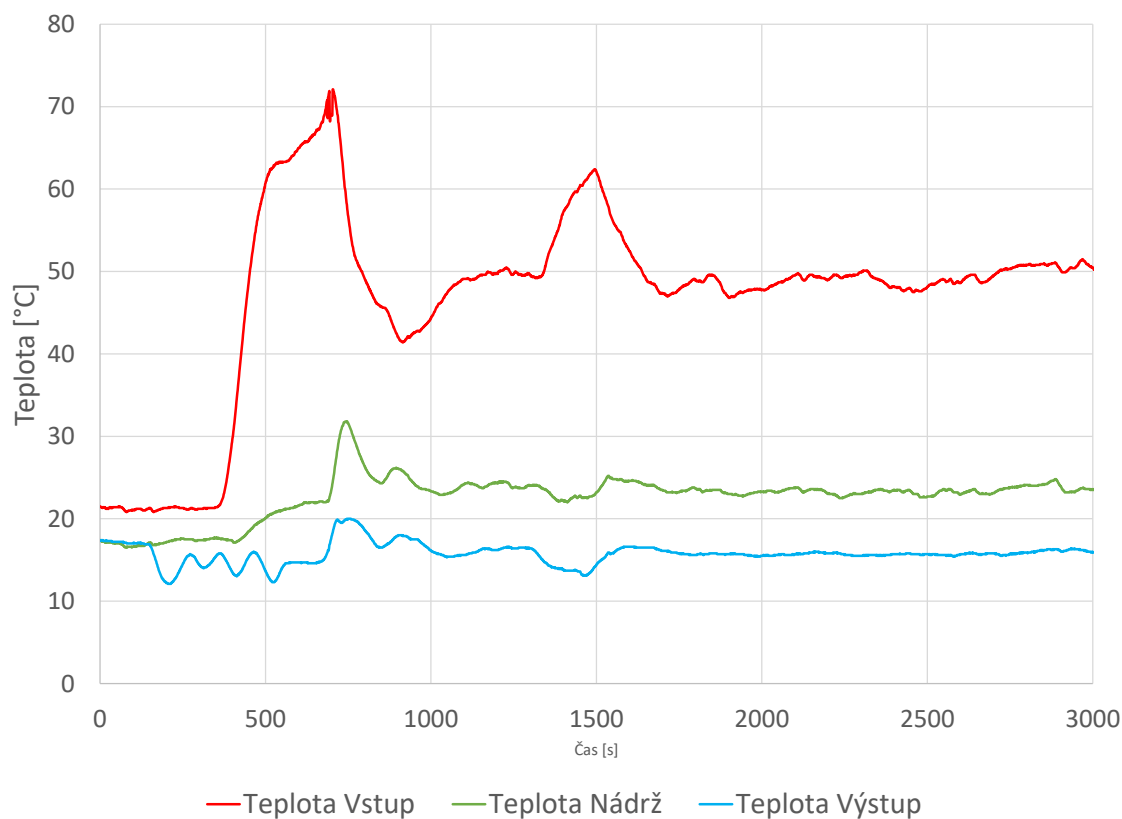
Graf 4.4 popisuje priebeh klesajúcej teploty vody v nádobe naprieč rôznymi konfiguráciami peltierových článkov.

4.2.2 Chladienie destilácie vody

Prvým testom chladiacej jednotky zapojenej na destilačnú kolonu bolo chladienie pár destilovanej vody. Ide o najhorší možný prípad a tým pádom o najväčšiu záťaž na chladiacu jednotku. Pretože pary dosahujú 100 °C a prietok je vyšší ako pri destilácii alkoholu. Celý priebeh teplôt vody v chladiacom okruhu je zaznamenaný v grafe 4.5. Výstupná teplota sa po naladení prietoku čerpadla pohybovala okolo 50 °C a vodný radiátor ju dokázal znížiť na teplotu 23-24 °C pri okolitej teplote vzduchu 20 °C.

Rozdiel medzi teplotou pred vstupom a po výstupe z vodných blokov osadených 8 kusami peltierových článkov, ktoré fungovali pri plnom napájanom napätí série 30 V, sa pohyboval okolo 8 °C.

Zvlnenie teploty výstupnej vody na začiatku priebehu mala za príčinu regulácia prúdu článkami tak, aby sa teplota držala v okolí 15 °C. Následne sa výstupná teplota držala naďalej na tejto hranici.

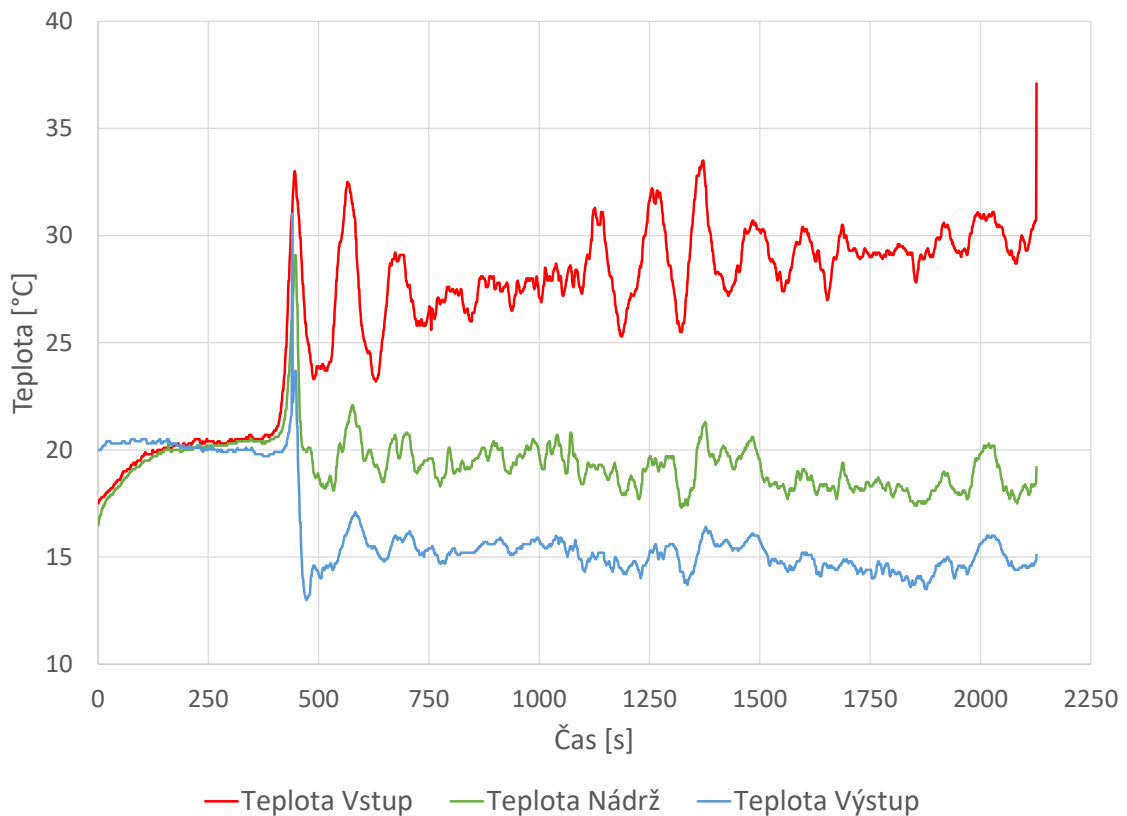


Obr. 4.5: Teploty vody v okruhu chladienia počas destilácie vody

4.2.3 Chladienie destilácie alkoholu

Testom, na ktorý bola chladiaca jednotka primárne konštruovaná je chladienie pár alkoholu. Tie dosahujú teplotu od 80 do 98 °C. Tento postupný nárast je reflektovaný na grafe 4.6 vo vstupnej teplote vody na prívode do chladiacej jednotky, kedy sa postupom času rovnako zvyšuje.

Tieto testy prebiehali vo večerných hodinách pri otvorenom okne, čiže okolitá teplota sa pohybovala zhruba okolo 17 °C. Podstatný je však rozdiel teplôt na vodných blokoch medzi expanznou nádržou a na výstupe chladiacej jednotky. Ten sa pohyboval okolo 5 °C, avšak pri napájanom napätí štvorice peltierových článkov nastavenej iba na 12 V. Čo reprezentuje 3 V na článok a pri prúde 1,5 A to znamená príkon 4,5 W na článok. Celkový príkon bol teda iba 36 W vďaka nízkej okolitej teplote. Rýchlosť prietoku v chladiacej sústave bola priškrtená na najnižšiu možnú úroveň, ktorú pumpa dovoľovala aby nedochádzalo k jej zastaveniu.



Obr. 4.6: Teploty vody v okruhu chladienia počas destilácie vína

Záver

Zadaním práce bol rozbor destilácie alkoholu, ktorému sa venuje prvá kapitola. Obsiahnutý v nej je popis a základné parametre destilačných prístrojov, ako aj ich vplyv na výsledný destilát. Text je venovaný aj postupom a práci s destilačnou kolonou, jej príprave na destiláciu a oddeľovaniu frakcií destilátu. Uvedený je aj obecný postup pre získanie niektorých druhov alkoholických nápojov a ich následné spracovanie do podoby želaného druhu destilátu.

Po výbere vhodnej destilačnej kolony pre podmienky práce nasledovalo testovanie a overenie si získaných teoretických poznatkov pri prvých pokusoch destilácie. Ako aj otestovanie postupov pri destilácií vína. Na týchto základoch bola destilačná kolona doplnená o elektronické senzory sledujúce hodnoty potrebné pre správnu reguláciu celého procesu. Použité elektronické súčasti sú popísané a odôvodnený ich výber v kapitole Rozboru.

Pre toto zapojenie boli vytvorené dva plošné spoje ako pre riadiacu jednotku, tak aj pre jednotku chladenia. Zlepšujú manipuláciu so zariadením a urýchľujú jeho zostavenie. Samotná konštrukcia zapojenia by si však vyžadovala pre navýšenie pohodlia pri manipulácii ešte implementovanie elektroniky riadenia a chladenia do samostatných konštrukčných krabíc. S dôrazom na tieto skutočnosti bol aj koncipovaný návrh a výber jednotlivých komponentov, aby takého umiestnenie bolo možné a jednoduché na realizáciu.

V priebehu príprav softwarového riešenia pre celkovú funkčnosť mikrokontroléru počas riadenia procesu destilácie bolo vytvorených mnoho čiastkových riešení pre jednotlivé komponenty. Po odladení ich funkčnosti pre potreby práce boli tieto algoritmy využité vo finálnom softwari zapojenia. Kde už ako celok spolupracovali na ovládaní, nastavení elektroniky pre destilačnú kolonu a riadili proces destilácie.

Ladenie parametrov regulátoru prebiehalo pre 3 druhy vstupného produktu, ktoré vzišli ako najčastejšie požadované pri rôznych cieľoch destilácie. Boli nimi alkohol pre destiláciu s koncentráciou 10 % a 15 %, ktoré reprezentujú prvú destiláciu napríklad kvasu, alebo vína a druhú destiláciu vzniknutého lutru z prvej destilácie, alebo macerovací roztok bylín a korenín pre výrobu napríklad ginu a iných bylinných destilátov. Program druhej destilácie možno použiť aj na maceráciu parami alkoholu, v prípade vloženia želaných aromatických surovín do kotla destilačnej kolony nad úroveň hladiny. Tretím programom bolo nastavenie regulátoru pre destiláciu vody.

Záznamy priebehov z fungovania regulácií sú zobrazené a popísané v kapitole meraní. Mimo regulácie je pojednávané aj o priebehoch teplôt a dimenzovaní chladiacej jednotky.

Literatúra

- [1] *Arduino Nano* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardNano>
- [2] *Destilační přístroj Destylex* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: https://www.gastroeu.cz/_obchody/gastro.web5.cz/prilohy/6/destylex-destilacni-pristroj-varianta-i-5-l-0.png.big.jpg
- [3] BOTHE, Carsten. *Domácí pálenky a likéry: destilace, dochucování, stáčení*. Praha: Vašut, 2020. ISBN 978-80-7541-177-8.
- [4] SCHMICKEL, Helge a Bettina MALLE. *Domácí výroba lihovin*. Vyd. 2., rev. Praha: Beta, 2010. ISBN 978-80-7306-430-3.
- [5] UHROVÁ, Helena. *Domácí výroba slivovice a ostatních destilátů, ovocných šťáv, sirupů a vín*. II. vydání. [Líbeznice]: Víkend, 2015. ISBN 978-80-7433-123-7.
- [6] *Finder Řada 36*. Dostupné také z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.634-811.1.pdf>
- [7] Iberian Coppers. In: *Iberian Coppers* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.copper-alembic.com/>
- [8] *Kvasná zátka* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/cs/Kvasn%C3%A1_z%C3%A1tka
- [9] *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. 2019. Dostupné také z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [10] *RCAD10* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <http://cateringroyal.de/en/node/923>
- [11] *Tabulka závislosti hustoty na obsahu ethanolu (lihová tabulka)* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: http://www.lekopis.cz/Kap_5_5.htm
- [12] *Varič Sencor* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.sencor.cz/varic/scp-1503wh-eue3>
- [13] *VÝROBA LIHU SULFITOVÉHO NEBO LIHU SYN-TETICKÉHO* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: http://www.socr.cz/file/1512/32_vyroba_a_uprava_lihu.pdf

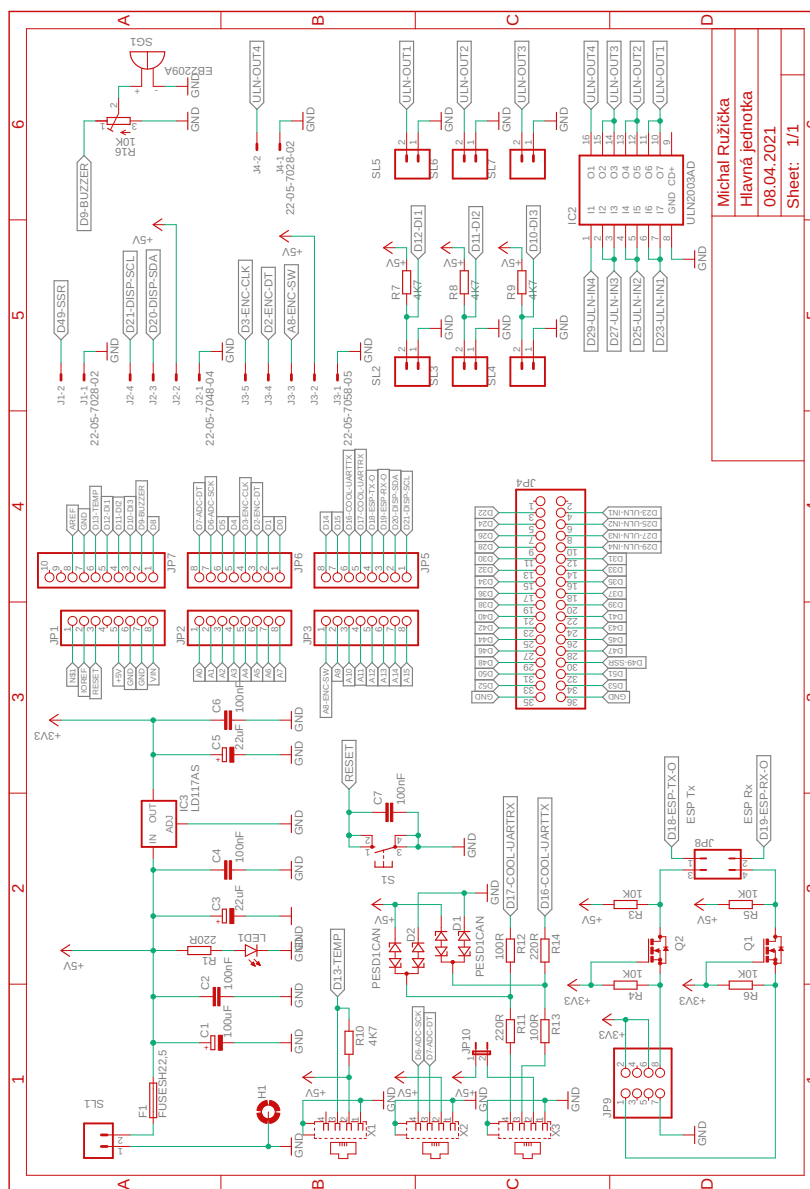
- [14] Water-ethanol azeotropic point. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/272723758/figure/fig4/AS:413476439773188@1475591873231/Water-ethanol-azeotropic-point.png>
- [15] *Water jackets* [online]. In: . [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://i.pinimg.com/originals/ec/ac/3a/ecac3aeb598a586923306fb022b5e942.jpg>
- [16] *YZC-131A Load Cells*. Dostupné také z: <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/YZC-131A.pdf>
- [17] *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. Dostupné také z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

DPS	Doska plošných spojov
ADC	Analógovo-Digitálny prevodník – Analog-Digital Converter
PWM	Pulzne šírková modulácia – Pulse width modulation
SSR	Polovodičové relé – Solid-State Relay
MSB	Najvýznamnejší bit – Most Significant Bit
IO	Vstupno-výstupný (pin) – Input-Output

A Hlavná jednotka

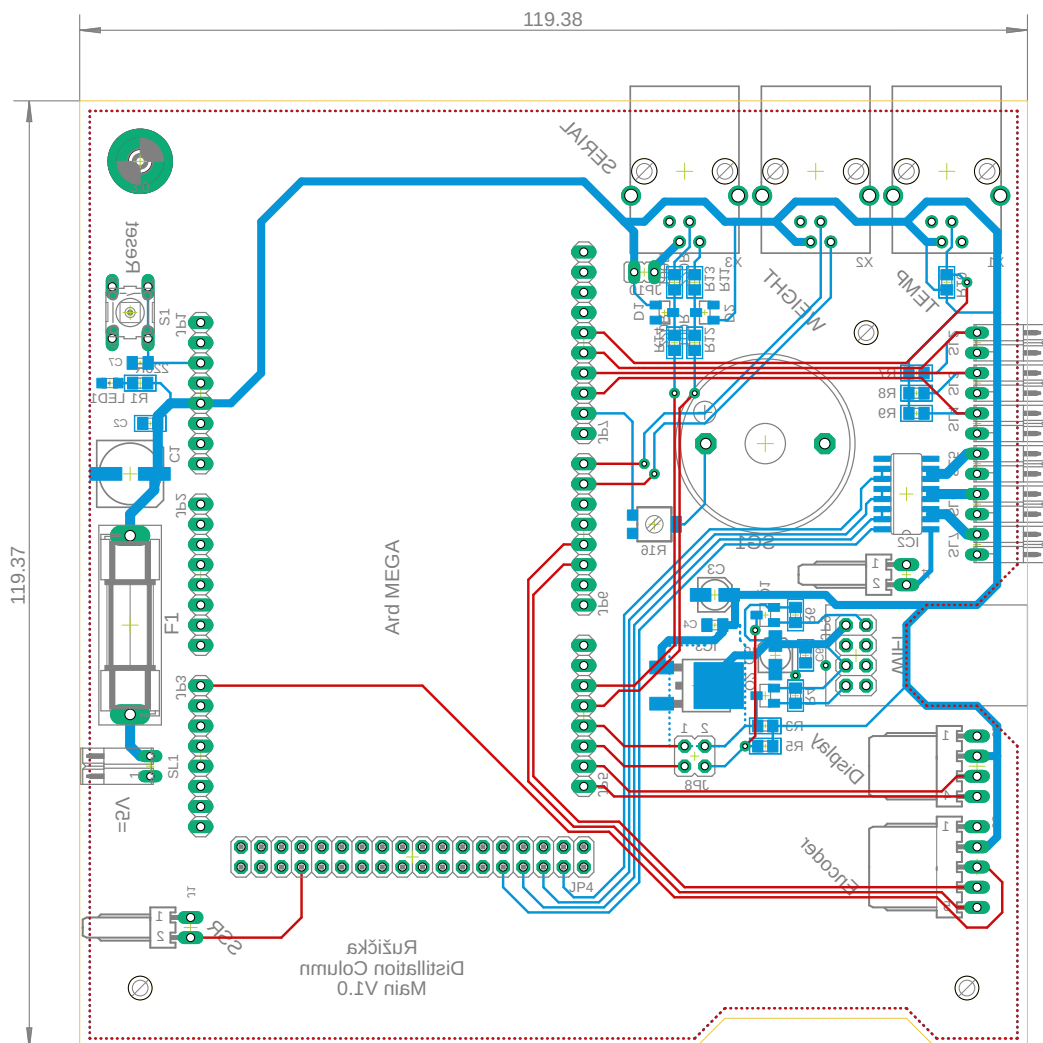
A.1 Schéma hlavnej jednotky



Michal Ružička
Hlavná jednotka
08.04.2021
Sheet: 1/1

Obr. A.1: Schéma zapojenia hlavnej jednotky

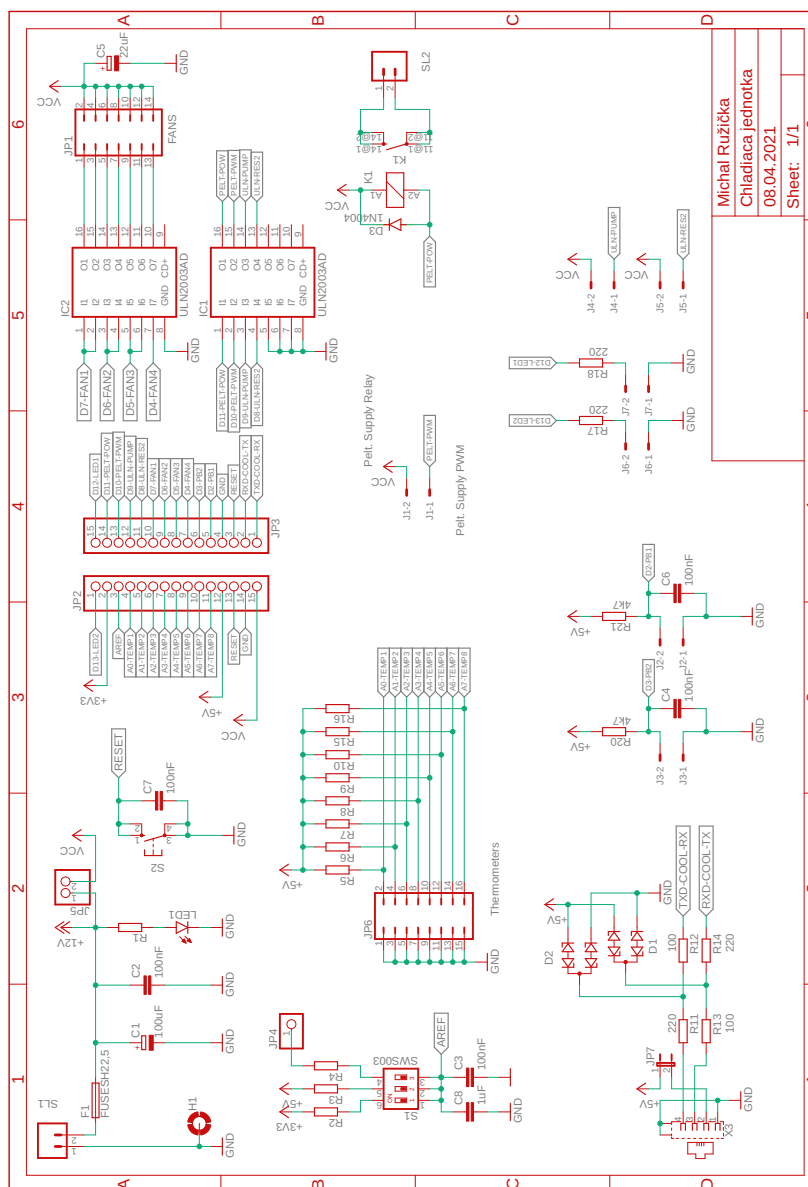
A.2 Plošný spoj hlavnej jednotky



Obr. A.2: Plošný spoj zapojenia hlavnej jednotky

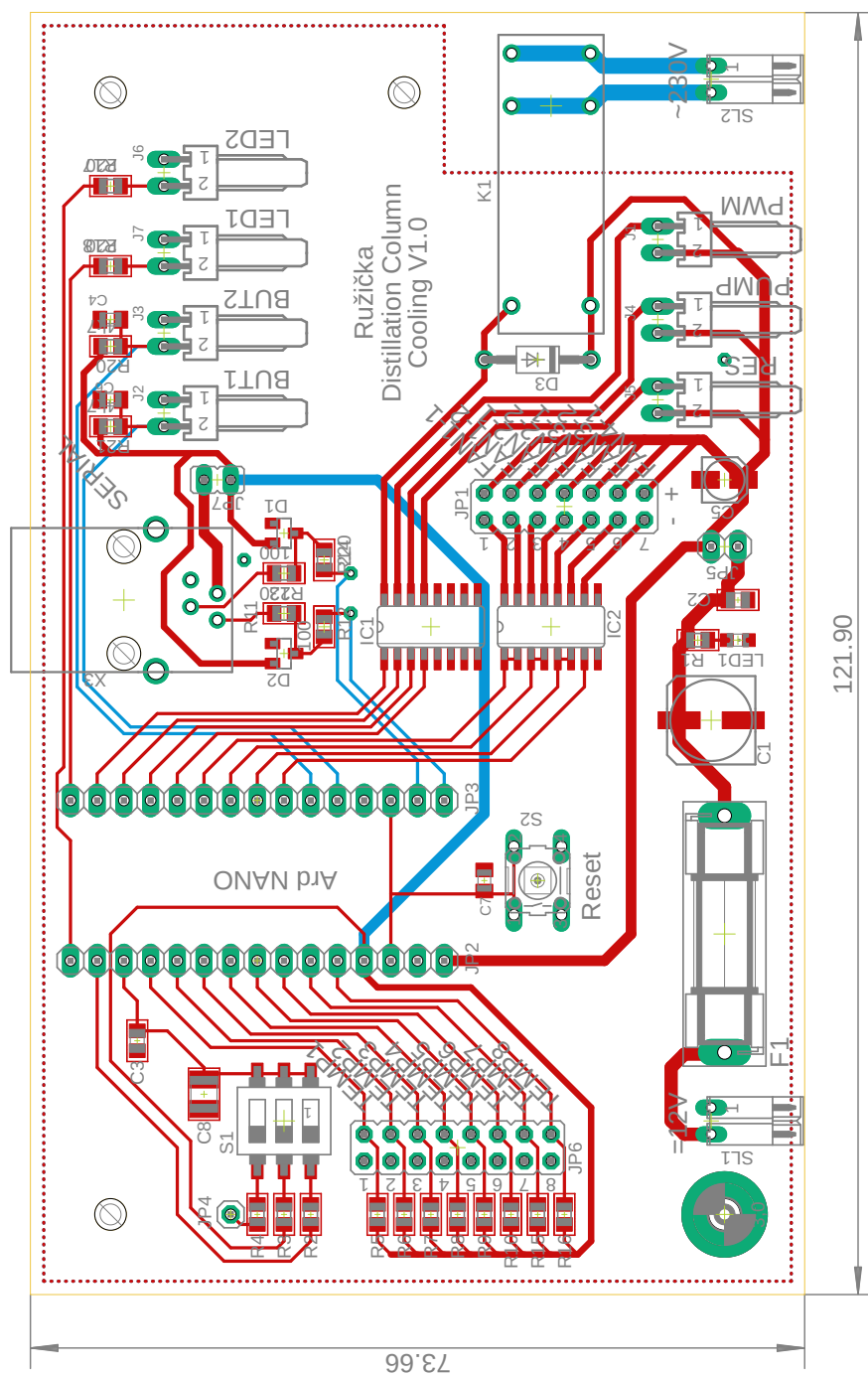
B Chladiaca jednotka

B.1 Schéma chladiacej jednotky



Obr. B.1: Schéma zapojenia chladiacej jednotky

B.2 Plošný spoj chladiacej jednotky



Obr. B.2: Plošný spoj zapojenia chladiacej jednotky