



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**FILTRACE V TECHNOLOGII VÝROBY PIVA
FILTRATION IN BREWING INDUSTRY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: TZSI

Studijní obor: Bezoborový

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

MAREK MIKULEC



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro: **Marek Mikulec**

Program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor: 2301R000 bezoborový

Název tématu: **Filtrace v technologii výroby piva**

Title: **Filtration in brewing industry**

Zásady pro vypracování:

Zpracujte rešerši zaměřenou na proces filtrace a zařízení v technologii výroby piva. V rámci práce zpracujte následující dílčí cíle:

1. Popište technologii výroby piva s důrazem na filtrační procesy.
2. Na základě literární, patentové a průmyslové rešerše popište princip a konstrukci filtrů vyskytujících se v této technologii.
3. Pro vybraný filtr popište metodiku výpočtu jeho provozních parametrů a základních rozměrů.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: rozsah cca 25 stran

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 25. dubna 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 10. června 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne 25.4.2016

.....

T.J.
.....
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 19. dubna 2016

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Marek Mikulec

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za jeho čas, cenné připomínky a odborné vedení této bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Marek
Příjmení autora:	Mikulec
Název práce česky:	Filtrace v technologii výroby piva
Název práce anglicky:	Filtration in brewing industry
Rozsah práce:	počet stran: 42 počet obrázků: 14 počet tabulek: 5 počet příloh: 0
Akademický rok:	2015/2016
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Anotace česky:

Bakalářská práce se zabývá problematikou filtrace piva malých a středních pivovarů. V první části je zaměřena na teorii vaření piva, jejíž znalost je nezbytná k návrhu zařízení. V druhé části jsou shrnuty technologie filtrace a zařízení využívaných v pivovarech. Poslední část práce je zaměřena na návrh konkrétního filtračního zařízení.

Anotace anglicky:

The aim of this thesis is to evaluate the technology of beer filtration in small and medium size breweries. The first part concentrates on general principles of brewing beer as the knowledge of brewing procedure is necessary for projecting the filtration scheme. The second part summarizes filtration technologies and targets on particular device commonly used in breweries. The final section of this thesis brings a scheme of a filtration device.

Klíčová slova: Výroba piva, filtrace piva, filtrační zařízení, svíčkový filtr

Využití: Přehled filtračních zařízení, návrh filtračního zařízení

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Technologie výroby piva	10
2.1	Historie výroby piva	10
2.2	Suroviny pro výrobu piva	10
2.2.1	Slad.....	10
2.2.2	Chmel	12
2.2.3	Voda	12
2.2.4	Kvasnice	12
2.3	Postup výroby piva.....	13
2.3.1	Rozemletí sladu - šrotování	13
2.3.2	Vystírání a zapařování.....	13
2.3.3	Rmutování.....	14
2.3.4	Scezování sladiny a vyslazování mláta	15
2.3.5	Vaření sladiny s chmelem - chmelovar	15
2.3.6	Chlazení mladiny	16
2.3.7	Kvašení	16
2.3.8	Filtrace	17
2.3.9	Pasterace.....	17
3	Filtrace pevných částic v pivovarech	18
3.1	Princip filtrace	18
3.2	Povrchová filtrace	18
3.3	Koláčová filtrace	19
3.3.1	Filtrace za konstantního rozdílu tlaků.....	19
3.3.2	Filtrace za konstantní filtrační rychlosti.....	20
3.3.3	Filtrace s hydrodynamickým čerpadlem.....	20
3.4	Koláčová filtrace s pomocným médiem	20
3.4.1	Membránová filtrace	21
3.5	Hloubková filtrace	22
3.6	Zařízení pro koláčovou filtraci	23
3.6.1	Scezovací kád'	23
3.6.2	Kalolis	24

3.7	Zařízení pro koláčovou filtraci s pomocným médiem	25
3.7.1	Listové křemelinové filtry	25
3.7.2	Svíčkové filtry	26
3.7.3	Modulové filtry	28
3.7.4	Zhodnocení konstrukcí koláčových filtrů	28
3.8	Zařízení pro hloubkovou filtraci	29
3.8.1	Pískové otevřené filtry	29
3.8.2	Pískové uzavřené filtry	29
4	Návrh zařízení	31
4.1	Vlastnosti látek	31
4.1.1	Křemelina	31
4.1.2	Pivo	32
4.1.3	Svíčkový filtr	33
4.2	Výpočet tlakové ztráty filtračního zařízení	34
4.2.1	Poróznost vrstvy křemeliny	34
4.2.2	Filtrační plocha	34
4.2.3	Výška filtračního koláče	35
4.2.4	Maximální tlaková ztráta	36
4.2.5	Doba filtračního cyklu	37
5	Závěr	39
6	Seznam použitých zdrojů	40
7	SEZNAM SYMBOLŮ	42

1 Úvod

Slabě alkoholický nápoj z obilného sladu, vody a chmele s charakteristickou hořkostí a zlatavou barvou je známý po staletí. Tisíce variací, odstínů a chutí. Nejoblíbenější nápoj pro řadu národností a kultur, jehož výroba není snadná, avšak neodradí nespočet nadšenců od zakládání nových minipivovarů, velkopivovarů či vaření domácího piva pro vlastní potěšení a zábavu. Pivo má bohatou historii a s neodmyslitelným technologickým pokrokem dnešní doby se rozvíjí i způsob přípravy.

Výroba piva je složitý biochemický proces. Cílem této bakalářské práce je zaměřit se pouze na jednu z fází finální úpravy, která zajišťuje trvanlivost piva a tím umožňuje všem milovníkům tohoto nápoje vychutnat si pivo různých chutí a barev, tedy na filtraci. Dříve bylo pivo určeno k okamžité spotřebě v podnicích ležících v největší blízkosti pivovarů. V dnešní době nalezneme v obchodech piva z různých koutů nejen republiky, ale i světa. Aby se k zákazníkovi nápoj dostal se zachováním charakteristické barvy, vůně, chutě a původní jakosti, musela výroba projít řadou inovací. Právě filtrace takové možnosti přináší a tato práce si klade za cíl obeznámit s procesem, druhy filtrů, s možnými úskalími či naopak výhodami a nejčastěji využívanými způsoby filtrace.

Tato práce stručně popíše celou technologii výroby piva, avšak zejména se zaměří na části, v nichž dochází k filtraci. Podrobněji se budu věnovat filtrům a filtračním technologiím, konkrétně hrubým sladinovým filtrům a scezovacím kádím, ale také jemným hloubkovým filtrům. Největší pozornost bude věnována koláčovým křemelinovým filtrům.

V praktické části práce jsem navrhl filtrační zařízení, pro které jsem vybral svíčkový křemelinový filtr a inspiroval se filtry z nabídky firmy Bílek filtry, s.r.o.

2 Technologie výroby piva

2.1 Historie výroby piva

Pivo, jakožto slabě alkoholický nápoj připravovaný z různých obilných sladů zná lidstvo již několik tisíc let. Bylo důležitým vynálezem Babyloňanů, kteří jej vařili na území Euphratu a Tigridu, dnešním území Iráku. Znalosti jeho výroby se šířily především do Egypta. Důkazy z této doby prokazují existenci pivovarů velikosti současných středních pivovarů. Od Egyptanů převzali umění vaření piva staří Řekové, Římané a Germáni. Díky neznalosti základních kvasných procesů, špatné hygieně a použití primitivního nářadí bylo vaření piva závislé na náhodě. Odtud známá věta sládků: *Dej bůh štěstí!* Největší pokrok zaznamenalo pivovarnictví až v období průmyslové revoluce v 19. století.

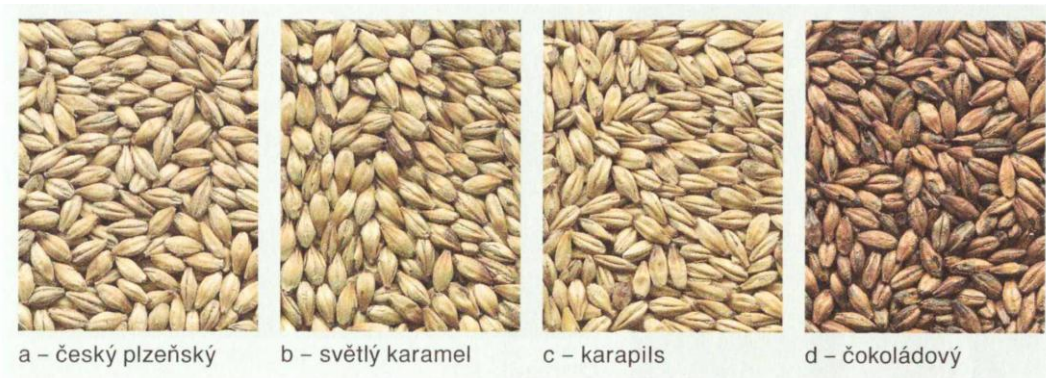
Na českém území vedla průmyslová revoluce, hlavně vývoj průtokového chlazení, ke vzniku spodně kvašených ležáků, výraznému omezení svrchně kvašených piv a využívání ječmene namísto pšenice. Dalším pokrokem této doby byl vznik tzv. strojních pivovarů a s ním i vznik samostatných obchodních sladoven, které zásobovaly tuzemské i zahraniční pivovary kvalitním sladem. [1,2]

2.2 Suroviny pro výrobu piva

2.2.1 Slad

Slady jsou směsí naklíčeného a následně usušeného ječmene. Technologií klíčení a hvozdění (sušení) lze ovlivnit typické vlastnosti sladu jako jeho aciditu, míru tvorby barevných a aromatických sloučenin. Je důležité používat slady připravené z pouze jedné či dvou geneticky podobných odrůd ječmene.

Pro výrobu piva se nejvíce používají slady z jarních ječmenů. Tyto odrůdy ztrácejí po několika letech výsadby své specifické vlastnosti a je nutno je nahradit nově vybranými odrůdami.[1]



Obrázek 1: zrna různých druhů sladů [1]

Světlé slady plzeňského typu se používají pro výrobu světlých ležáků a výčepních piv. Pro tyto slady je typická nízká hodnota barvy kongresní sladiny (3,0 až 4,2 jednotek EBC¹) a barvy po povaření. Toto je dáno nízkou teplotou hvozdění okolo 80 až 85 °C, při které se tvoří aromatické a barevné látky. Pro moderní velkokapacitní výrobu piva je důležitá čistota, homogenita a stupeň modifikace sladů.

Tmavé slady mnichovského typu se často uvádějí jako bavorské slady. Charakteristická je vyšší hodnota barvy kongresní sladiny (11,0 až 17,3 jednotek EBC), vyšší obsah bílkovin, výraznější aroma a vyšší teplota hvozdění pohybující se kolem 100 až 105°C.

Pšeničné slady se používají pro výrobu speciálních piv zejména v Německu a v Belgii, kde poměr pšenice ve sladě dosahuje od 40 do 80%. Tato piva se obecně vyznačují vyšší pěnovostí, takže se využívá přídavek malého množství pšeničného sladů u piv z ječného sladů se špatnou stabilitou pěny.

Speciální slady jako slady karamelové, barvicí, nakuřované a pražené se používají pro úpravu barvy, chuti, pěnovosti piva a k odolnosti proti předčasné tvorbě koloidního zákalu.

Z ekonomických důvodů je často používán škrob z jiných zdrojů než ze sladů, například z kukuřice, brambor, rýže, škrobový sirup z řepy a třtiny. Tradiční pivovarské země střední Evropy jsou proti tomuto často chráněny legislativou. [1]

¹ EBC = European Beer Convention je jednotka udávající barvu a zákal piva. Vyjadřuje úbytek světla o vlnové délce 430 nm po průchodu vrstvou piva o tloušťce 1cm. Měří se spektrometrem. Velmi světlá plzeňská piva nabývají hodnot od 3 EBC, naopak pro velmi tmavá piva jako Imperial Stout jsou typické hodnoty až 79 EBC. [1]

2.2.2 Chmel

Chmel byl znám již od dávnověku. Dříve se pěstoval jako kulturní rostlina a pro ochucování medoviny, později ho v 8. století našeho letopočtu začali Slované hojně využívat pro výrobu piva.

Chmel je dosud nezastupitelnou surovinou dodávající pivu typickou hořkost a aroma, ovlivňuje jeho technologii a další kvalitativní vlastnosti piva. Nositelem hořkosti chmele jsou obecně chmelové pryskyřice a třísloviny. Hořké látky chmelu vykazují bakteriostatické vlastnosti, sedativní a antiseptické účinky. Může omezovat růst zhoubných nádorů.

V pivovarnictví se ke chmelení používá jak sušený lisovaný hlávkový chmel, tak i výrobky z chmelu. Nejčastěji prášky a pelety, které mají vyšší obsah hořkých látek než surový chmel, dále také ethanolové extrakty. [1]

2.2.3 Voda

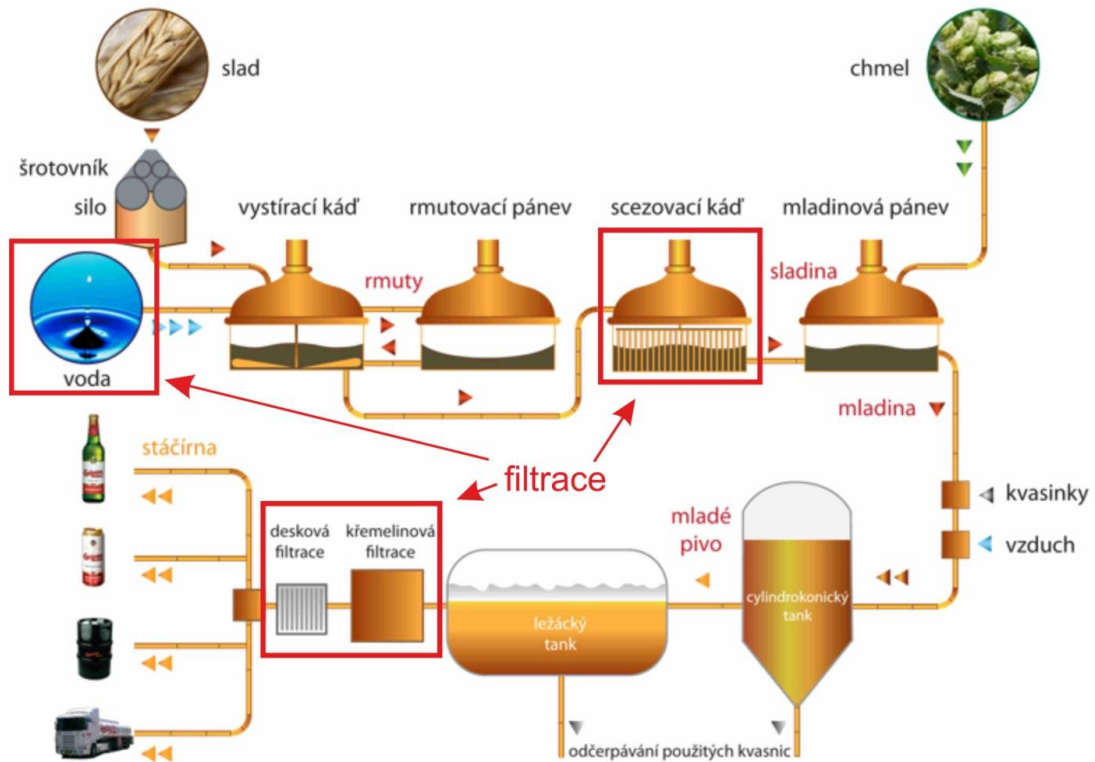
Voda tvoří největší část hmotnosti piva, a proto je důležité jí věnovat pozornost. V současnosti se využívá řada moderních technologií úpravy varných vod. Jako varné vody se nejvíce hodí spodní vody z pramenů nebo vrtů, avšak z ekonomických důvodů je dnes běžné použití upravené vody z vodovodního řádu. Plzeňský prazdroj využívá měkkou vodu s nízkým obsahem minerálů hodící se pro silně chmelená, spodně kvašená piva. Oproti tomu dortmundské a vídeňské vody jsou velmi tvrdé.

Před použitím varných vod musí dojít k odstranění nežádoucích rozpuštěných látek, deaeraci (odvzdušnění) a sterilaci vody. [1, 5]

2.2.4 Kvasnice

Kvasnice jsou mikroskopické houby, jejichž vlastností je přeměna kvasných cukrů na alkohol. Každý pivovar používá určité kmeny kvasnic, podle typu kvašení. Spodní kvasnice se usazují do kalu na dně nádoby, naopak svrchní kvasnice vytvářejí kvasničnou deku na hladině. Více se kvašení budu věnovat v odstavci 2.3.7. [1, 5]

2.3 Postup výroby piva



Obrázek 2: Technologický postup výroby piva v Budějovickém Budvaru [6]

2.3.1 Rozemletí sladu - šrotování

Účelem této operace je vymletí endospermu zrn sladu. Důležité je zachování celistvosti obalových pluch, které slouží k filtraci sladiny při dalších procesech vaření. Mletí sladu se provádí za sucha, s kondicionováním (zvlhčením sladu párou) nebo za mokra. K tomuto procesu se využívají mlecí stolice - šrotovníky. Využívá se několika po sobě jdoucích rýhovaných válců, které zrna postupně rozemílají. Součástí tohoto zařízení je vibrační čistička, magnetický odlučovač kovových nečistot a váha pro výpočet varného výtěžku. [1]

2.3.2 Vystírání a zapařování

Cílem vystírání je smíchání sladového šrotu s varní vodou, následkem čehož vznikne kašovitá směs. Vystírat můžeme studenou vodou pod 20°C pro špatně rozluštěná zrna. To má za následek drsnější chuť a horší pěnivost piva. Teplé vystírání při teplotách

35 až 38°C je vhodné pro typická česká piva. Teplota vystírky se zvýší na 50°C zapařováním, tj. přidáním horké vody o teplotě 80°C. Horké vystírání při teplotách 50 až 62°C je vhodné pro přelustěné slady. Doba vystírání se pohybuje kolem 30 minut podle technologie šrotování.

Proces vystírání se odehrává ve vystíracích pánvích nejčastěji kruhového průřezu vyrobené z mědi nebo nerezové oceli. Výchřevná plocha těchto nádob musí být schopna zvýšit teplotu celé vystírky o $1,5^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Součástí nádoby je vystěradlo sloužící k rovnoměrnému smíchání šrotu s vodou. [1]

2.3.3 Rmutování

Cílem tohoto procesu je převést optimální extrakt surovin, zvláště zkvasitelných cukrů, ze sladu do vodného roztoku. Způsob rmutování ovlivňuje kvalitu mladiny a celý další proces výroby, je to proces závislý na přesném regulování teploty ve správný čas. Dělí se na dekokční a infuzní postupy.

Dekokční postup znamená postupné vyhřívání jednoho až tří podílů rmutu na důležité technologické teploty. Poté se zpět načerpá do vystírací pánve. Kvůli nepříznivému vlivu kyslíku na rmut probíhá přečerpávání a napouštění nádob spodem.

Pro rmutování je velmi důležité dosáhnout přesně stanovené kyselinotvorné teploty 35 až 38 °C, peptonizační teploty 45 až 50 °C, nižší cukrotvorné teploty 60 až 65 °C, vyšší cukrotvorné teploty 70 až 75 °C a konečně odmutovací teploty 76 až 78 °C. Teploty jsou obdobné u všech postupů rmutování.

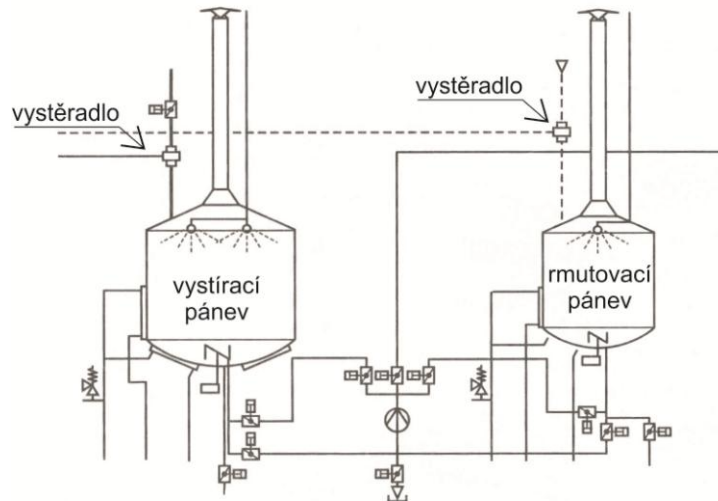
Třírmutový postup spočívá v napuštění asi třetiny objemu díla do rmutovací pánve a zvyšování teploty rmutu na rmutovací teploty dle technologického postupu. Poté je rmut načerpán zpět do vystírací pánve. Proces je opakován třikrát, jak už vyplývá z názvu postupu. Používá se pro speciální piva a tmavá piva.

Dvourmutový postup je nejběžnější a používá se i v českých pivovarech. Do rmutovací pánve se napustí třetina díla jako při třírmutovém postupu, ale opakuje se pouze dvakrát s rozdílnými teplotami a časem výdrže na rmutovacích teplotách.

Jednormutový postup je obdobný jako dvourmutový a třírmutový, využívá se pro dobře rozluštěné slady a spíše světlá, nízkoprocentní výčepní piva.

Infuzními postupy se látky ze sladu uvolňují dlouhodobým působením enzymů bez mechanického a tepelného působení rmutů. Tato technologie je vhodná pro svrchně kvašená piva světlejší barvy.

Rmutovací pánve jsou menších rozměrů než vystírací pánve, dříve s přímým otopem uhlím, dnes se využívá přehřáté vodní páry. Musí být zajištěna rychlost ohřevu o $2^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Součástí pánve je míchadlo s otáčkami do 20 min^{-1} . [1]



Obrázek 3: Vystírací dvounádobová soustava [1]

2.3.4 Scezování sladiny a vyslazování mláta

Scezování je prvním stupněm filtrace, která oddělí roztok obsahující extraktivní látky sladu od zbytků sladového šrotu. Největší zastoupení mají v pivovarech scezovací kádě a sladinové filtry. Dalším krokem je vyslazování mláta. Po vypuštění mladiny se mláto napustí vodou o teplotě 75°C , prořízne se do hloubky 10 až 15 cm. Výtok se zastaví při dané intenzitě a zbylá tekutina - patok, dříve podávaná dobytku, se dnes přidává do vystírky další várky. Doba vyslazování je 90 až 120 minut. Celková doba scezovacího procesu se pohybuje kolem tří hodin. [1]

2.3.5 Vaření sladiny s chmelem - chmelovar

Odpaření přebytečné vody a rozpuštění hořkých silic z chmelu probíhá právě v tomto procesu. Mladina se sterilizuje a inaktivují se enzymy, které přetrvaly v předchozích procesech výroby. Důležitá je konstrukce pánve, ve které se musí mladina dostatečně

provařit, musí zajistit intenzivní pohyb mladiny pomocí míchadla a dokonalou extrakci důležitých složek chmele a chmelových přípravků. Doba chmelení je od 70 do 100 minut podle použitého chmelového přípravku při teplotě 100°C.[1]

2.3.6 Chlazení mladiny

Mladina musí před kvašením dosáhnout zákvasné teploty. Chladí se ze 100°C na 10 až 15 °C pro spodně kvašená piva a na 12 až 18 °C pro svrchně kvašená piva. Při tomto procesu je důležitá ochrana proti biologickému znečištění mladiny. Starý způsob chlazení je otevřený systém sprchového chladiče, kdy mladina stéká po měděných trubkách do sběrného korýtko, odkud se čerpá do kvasných nádob. Tento způsob je velmi náročný na objem chladicí vody.

Novými způsoby chlazení jsou uzavřené systémy protiproudých deskových a trubkových výměníků. Jako chladicí médium se používá podchlazená voda, ethylenglykol a solanka. Při tomto způsobu nedochází k provzdušnění mladiny vzdušným kyslíkem potřebnému ke správnému kvašení, proto je provzdušnění nutnou další operací. [1]

2.3.7 Kvašení

Fermentace mladiny probíhá ve dvou stupních. Prvním je hlavní kvašení. V této fázi dochází ke zkvašení velké části využitelných látek z mladiny, snižování hladiny sacharidů, vznikají základní metabolity kvašení - ethanol a oxid uhličitý. Oxid uhličitý se částečně rozpouští v mladině, a to do koncentrací 0,2 %. Dále dochází ke vzniku vyšších alkoholů, esterů a volných mastných kyselin. Dle Ballinga je hlavní kvasný proces shrnut rovnicí:



kde $C_6H_{12}O_6$ je zkvasitelná hexóza, $2C_2H_5OH$ je ethanol.

Hlavní kvašení probíhá v kvasných kádích, ale od tohoto řešení se již ustupuje kvůli obtížnému zajištění hygieny v okolí otevřených kvasných kádí a přechází se na CK tanky.

Dokvašováním, čili kvašením za nízkých teplot a zvýšeného tlaku se pivo sytí oxidem uhličitým, výrazně se zvyšuje koncentrace esterů a to až o 100% proti koncentraci na začátku dokvašování. V pivo se mění složení koloidních a těkavých látek a pivo získává přirozenou stabilitu. Dokvašováním se upravuje hořkost a kvasničná chuť piva, vytváří se typický buket a chuť piva. Spodně kvašená piva dozrávají v ležáckých tancích, umístěných do chlazených budov horizontálně, o objemu 3000 až 5000 hl.

CK tanky kombinují kvašení a dokvašování v jednom tanku. Jsou to vertikální válcové nádoby s kuželovým dnem a kulovou horní částí. Jsou vybaveny vnitřním chlazením a dosahují objemů až 30 000 hl. Je to v současnosti nejvyužívanější způsob kvašení a dokvašování od malých pivovarů až po velké pivovary.

Svrchně kvašená piva dokvašují převážně jednotlivě v lahvích. [1]

2.3.8 Filtrace

Při filtraci protéká kapalina pórovitou přepážkou, na níž se zachycují kvasnice a jiné tuhé částice. Filtrace běžně probíhá v několika po sobě jdoucích krocích, od povrchové až po hloubkovou filtraci.

Filtrační materiály se dělí na tři základní skupiny a to vláknité, zrnité a pórovité. [1]

2.3.9 Pasterace

Pasterace je tepelná úprava piva zajišťující jeho trvanlivost. Provádí se za teplot 68 až 70°C a výdrží 30 sekund v deskovém výměníku nebo za stejných teplot s výdrží na teplotě 20 minut v lahvích. [1]

3 Filtrace pevných částic v pivovarech

Filtrace piva je od druhé poloviny 19. století významným technologickým procesem v jeho výrobě. Pivo se filtruje nejen kvůli čirosti, ale hlavně kvůli zvýšené biologické a koloidní stálosti, což umožňuje delší trvanlivost a mezinárodní obchod. Důležité je zachovat pěnivost piva, nepřidávat kyslík, ionty kovů a další negativně působící sloučeniny. Filtrace probíhá v pivovaru ve třech hlavních technologických operacích. První je písková filtrace varní vody, druhá je oddělení mláta od sladiny ve scezovací kádi nebo ve sladinovém filtru. Poslední je odstranění kvasinek a jemných mechanických nečistot po ukončení procesu kvašení ve filtrech různých konstrukcí. [1,3]

3.1 Princip filtrace

Principem je protékání suspenze přes vrstvu porézního materiálu, kde dojde k odloučení pevné fáze od tekutiny. Při filtraci tekutina projde skrz porézní vrstvu filtru, ale pevné částice se ve vrstvě zachytí. Podle mechanismu zachycování pevných částí se filtrace dělí na povrchovou a hloubkovou. [3]



Obrázek 4: Schéma povrchové a hloubkové filtrace [1]

3.2 Povrchová filtrace

Při povrchové filtraci se využívá síťového efektu, kdy jsou otvory v porézní vrstvě menší než pevné částice a dochází k zachycování těchto částic na porézní přepážce. Tímto způsobem se filtrují nejčastěji hrubé částice koláčovými filtry, ale i velmi jemné částice membránovými filtry. Pokud je třeba filtrovat bakterie, viry či koloidy, jedná se o ultrafiltraci. [3]

3.3 Koláčová filtrace

Koláčová filtrace je nejrozšířenější způsob filtrování suspenzí v potravinářském průmyslu. V pivovaru ji najdeme ve scezovací kádi nebo ve sladínovém filtru, kde slouží k oddělení mláta od sladiny. Tato technologie je ve většině provozů snadno zvládnutelná při zanedbání vedlejších chemických a fyzikálních jevů, které do zjednodušených výpočtů můžeme vložit jako experimentálně zjištěné konstanty.

Koláčová filtrace je v podstatě průtok suspenze porézní přepážkou složenou z vrstvy o konstantní tloušťce - filtračního materiálu, a z vrstvy filtračního koláče, tvořeného pevnými částicemi, jejichž výška v průběhu filtrace narůstá. Po filtraci obvykle ve filtru probíhají další operace. Filtrační koláč se promývá, aby se z něj dostala všechna cenná základní kapalina, nebo se naopak odvodňuje, suší a získává se z filtru, pokud jej chceme zachovat. Koláčová filtrace probíhá v režimu za konstantní filtrační rychlosti (suspenze je dodávána do filtru hydrostatickým čerpadlem) nebo za konstantního rozdílu tlaků (konstantní tlakový spád je udržován podtlakem za filtrační přepážkou nebo tlakem plynu nad hladinou suspenze v zásobníku před filtrační přepážkou). V některých případech se využívá i hydrodynamického čerpadla, tlakový rozdíl a filtrační rychlost jsou v tomto případě proměnné. Důležitým faktorem při návrhu filtračního zařízení je míra stlačitelnosti koláče. [1, 3]

3.3.1 Filtrace za konstantního rozdílu tlaků

Konstantní rozdíl tlaků před a za filtrační přepážkou je udržován buď konstantním tlakem plynu nad hladinou suspenze, konstantním podtlakem za přepážkou či konstantní výškou vodního sloupce suspenze. Závislost filtrační rychlosti na čase vyjadřuje rovnice:

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{2at + b^2}} \quad (3.3-1)$$

kde a je funkcí dynamické viskozity a hustoty suspenze, relativního podílu pevné fáze v suspenzi a specifického odporu koláče, b je funkcí dynamické viskozity suspenze a odporu filtrační přepážky. Hodnoty a a b jsou konstanty. Z toho vyplývá, že filtrační rychlost při filtraci za konstantního rozdílu tlaků s časem klesá. [3]

3.3.2 Filtrace za konstantní filtrační rychlosti

Suspenze je při tomto způsobu filtrace dodávána obvykle hydrostatickým čerpadlem pístovým, zubovým, lamelovým či s flexibilním oběžným kolem. Hydrostatické čerpadlo totiž zajišťuje při konstantním průtoku (a tedy konstantní filtrační rychlosti) pokrytí nárůstu tlaku za jeho výtlačným hrdlem, na rozdíl od filtrace dle odst. 3.3.3. Režim vyjadřuje tato rovnice:

$$u_0 = \frac{dv}{dt} = konst \quad (3.3-2)$$

Výsledkem integrace rovnice (3.3-2) je rovnice (3.3-3), kde je vidět, že závislost zfiltrovaného objemu v na čase je přímková a filtrační rychlost je tedy konstantní. [3]

$$v = u_0 t \quad (3.3-3)$$

3.3.3 Filtrace s hydrodynamickým čerpadlem

Tento způsob je z hlediska výpočtu nejsložitější, tlak i filtrační rychlost jsou proměnné. Grafická závislost hydrodynamického čerpadla se musí určit experimentálně. [3]

3.4 Koláčová filtrace s pomocným médiem

Pro dosažení lepších výsledků při filtrování suspenze s velmi malými částicemi se využívá pomocného média utvářejícího koláč. V pivovarství je tímto médiem křemelina².

Koláčové filtry využívající křemelinu se v pivovarech používají k filtraci kvasnic z již zkvašeného piva. Filtry se dělí podle konstrukce na filtry listové, svíčkové a kalolisy.

Pro všechny výše uvedené filtry probíhá naplavení obdobným způsobem. Naplavovací suspenzi tvoří voda a v ní rozmíchaná křemelina, která se po průchodu této suspenze filtrační přepážkou usadí na jejím povrchu. Po dosažení potřebné výšky koláče křemeliny je započata vlastní filtrace piva. Do piva se také dávkuje křemelina v

² Křemelina je práškový filtrační materiál tvořený schránkami sladkovodních či mořských rozsivek. Částice s velikostí 5 až 20 μm mají velmi různorodý tvar a tvoří tak velmi účinnou filtrační vrstvu. Křemeliny se začalo využívat k čištění piva ve třicátých letech 20. století v anglosaských zemích.

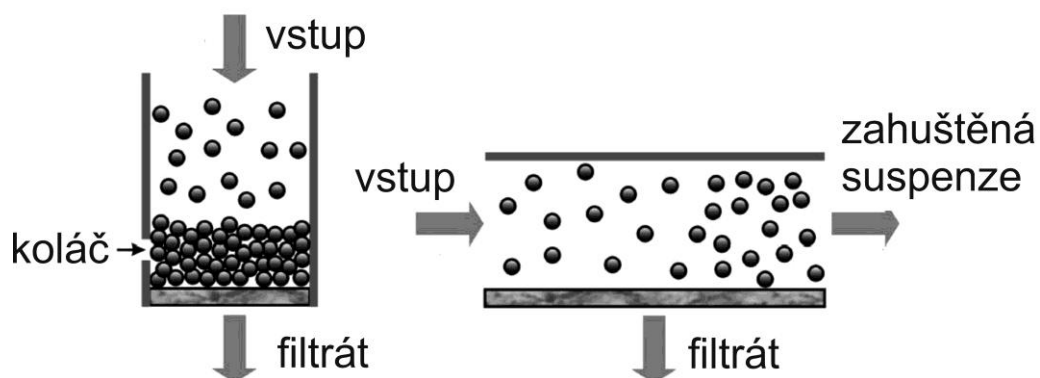
množství od 50 do 150 g/hl kvůli překryvání vrstvy zfiltrovaných kvasnic a zajištění stejné kvality filtrátu v průběhu filtračního cyklu. [1,3]

3.4.1 Membránová filtrace

Membránová filtrace je moderní technologie, která přináší revoluci do pivovarství. Řeší problém s těžko zužitkovatelnou odpadní směsí kvasnic a křemeliny. Sníží se tak náklady pivovarů na její spotřebu a následnou likvidaci. V neposlední řadě řeší problém se škodlivými účinky křemeliny na lidské zdraví, které jsou v současnosti stále častěji diskutovaným tématem.

Existují dva základní typy membránové filtrace. Klasická vsádková filtrace (dead-end), známá též jako čochovitá, se skládá ze sestavy membrán s mikro póry o velikosti 0,02 až 10 μm . Princip je obdobný jako u koláčové filtrace a obvykle se dávkuje křemelina. Filtrační cyklus končí při zanesení membrán, poté je nutná jejich regenerace.

Druhý typ je křížová tangenciální filtrace (cross-flow). Tento způsob je univerzální, bezobslužný, lze filtrovat i velmi kalné tekutiny a nevzniká žádný filtrační odpad. Zde kapalina turbulentně proudí kolmo na semipermeabilní membránu za stálého tlaku a rychlosti 1 až 2 m/s. Tlakové síly okolo 0,7 MPa dodávané oběhovým čerpadlem tlačí kapalinu skrz membránu a pevné částice zůstávají v oběhu. Proud kapaliny zároveň čistí stěnu membrány. Filtrační cyklus končí, pokud již čerpadlo není schopno pro hustotu kapaliny zajistit dostatečný oběh nebo je dosažena požadovaná koncentrace částic v oběhu. [1,4]



Obrázek 5: Schéma dead-end filtrace (vlevo) a cross-flow filtrace (vpravo) [4]

3.5 Hloubková filtrace

Hloubková filtrace je známý proces úpravy pitné a užitkové vody. Hlavním rozdílem v principu filtrace oproti povrchové filtraci je zachycování suspendovaných částic v celém objemu filtrační vrstvy, nejen na jeho povrchu. Filtrační vrstva je v tomto případě mnohonásobně větší než u koláčových filtrů, obvykle 0,5 až 1,5 m. Tyto filtry jsou schopny zachytit velmi jemné částice větší než 10 μm .

Filtrační vrstvu tvoří zrnité materiály jako křemenné písky, antracit, aktivní uhlí, keramické materiály s rozměry zrn od 0,4 do 2,5 mm nebo vláknité materiály. Používají složené filtrační přepážky z vrstev o různé hrubosti zrn. Pro lepší výsledky filtrace je vhodné předřadit čiření a částice rozptýlené v suspenzi koagulovat před průchodem filtrem.

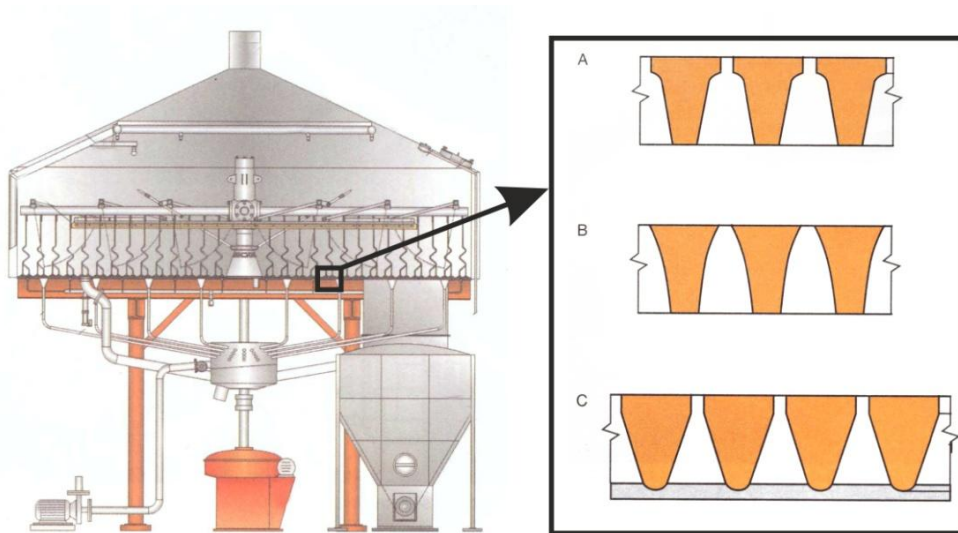
Hnací silou hloubkové filtrace je rozdíl tlaků před a za filtrační přepážkou, tvořený hydrostatickým tlakem sloupce suspenze, mamutkovým čerpadlem, tlakem plynu nad hladinou suspenze. Pro udržení průtoku a kvality filtrátu je třeba filtraci po určité době ukončit a zachycené částice (kal) vyprat. Doba filtračního cyklu je zpravidla 24 hodin. Praní filtru se provádí kombinací průtoku vody a vzduchu, nejlepších výsledků z hlediska spotřeby vody lze dosáhnout opakovaným střídáním průtoku vody a vzduchu s časovými intervaly 60 s přivádění vzduchu a 120 s přivádění vody.

Návrh těchto filtrů je velmi složitý. Zahrnuje velkou řadu experimentálně stanovených koeficientů a výpočty lze aplikovat pouze na zjednodušené případy. Nejvhodnější je v tomto případě využití experimentu s reálnou suspenzí a testovacím filtrem. Ten má průměr minimálně 150 mm a výšku filtrační vrstvy stejnou jako navrhovaný filtr. [1,3]

3.6 Zařízení pro koláčovou filtraci

3.6.1 Scezovací kád'

Scezovací kád' je ocelová či měděná tepelně izolovaná nádoba cylindrokónického tvaru. Ke dnu jsou připojeny scezovací kohouty, jeden na 1,2 až 1,5 m² plochy. Důležité je zajistit správnou rychlost průtoku kohouty, jež nesmí být vyšší než přirozená průtočnost vrstvy mláta. Při vyšší rychlosti průtoku dochází k sání, které přitahuje mláto ke scezovacímu dnu a zpomaluje tak scezování. Kohouty se také upravuje rovnoměrnost odtoku sladiny ze scezovací kádě.



Obrázek 6: Scezovací kád' s detailem na provedení scezovacím dnem

A - dvojitě frézované dno, B - jednou frézované dno, C - Sítové dno [2]

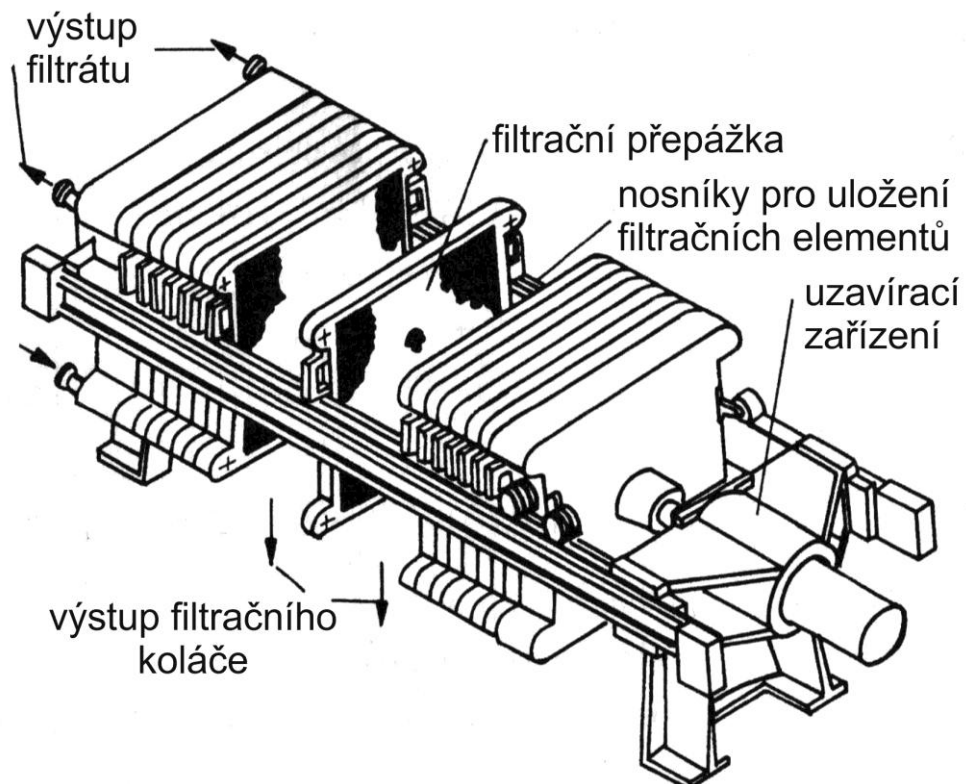
V jalovém vyjímatelném dně se nacházejí tenké štěrbinové otvory 30 mm dlouhé s četností 2500 až 3000 štěrbin na 1 m², které zajišťují průtočnou plochu 8 až 18% celkové plochy dna. V moderních kádích se otvory dvojitě frézují do segmentů z chromoniklového plechu. Důležitým prvkem je kypřidlo - soustava nastavitelných nožů, které prořezávají koláčovou vrstvu a zkracují tak dobu potřebnou ke scezování. [1]

3.6.2 Kalolis

Kalolisy se využívají v pivovarech jako sladinové filtry, ale i jako křemelinové filtry pro filtraci kvasinek z piva. Vykazují vyšší rychlost scezování než ve scezovací kádi, dovolují scezovat velkoobjemové várky. Při použití jako sladinový filtr je třeba jemnějšího mletí sladu. Koláčová vrstva má v tomto případě konstantní tloušťku několika centimetrů.

Sestava rámového kalolisu se skládá obvykle z 35 rámuů vypnutých plachetkou z polypropylenu. Látkové plachetky se kvůli potřebě časté sanitace již nepoužívají. Membránovým čerpadlem je dílo za stálého míchání přivedeno rovnoměrně mezi plachetky sousedních modulů, kde vytvoří konstantní vrstvu mláta. Kanálky v žebrovaném povrchu desek je přiváděna vyslazovací voda, prostupuje vrstvou mláta a plachetkami, a je odváděna zpět žebrovaným povrchem do odtokového potrubí. Při celém procesu je nutné zvyšovat tlak plnění kvůli zanášení koláčové vrstvy, aby bylo dosaženo konstantní filtrační rychlosti.

Komorový kalolis je složen pouze z desek zesílených po obvodu. Tím vzniká komora mezi sousedními deskami. Postup přivádění suspenze a filtrace je stejný jako u rámového kalolisu. [1,3]

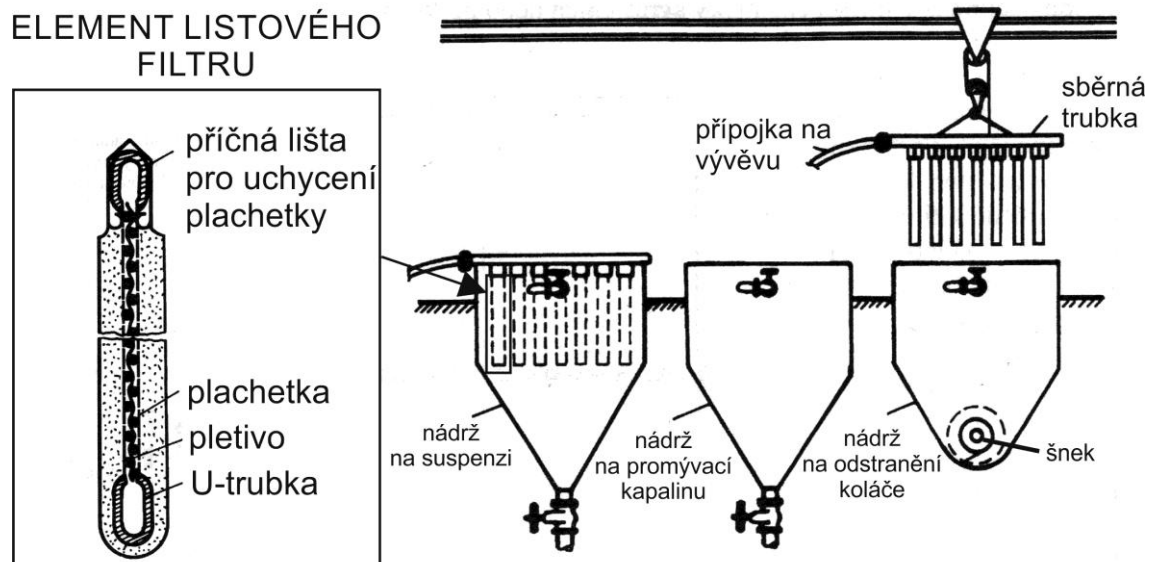


Obrázek 7: Uspořádání komorového kalolisu [3]

3.7 Zařízení pro koláčovou filtraci s pomocným médiem

3.7.1 Listové křemelinové filtry

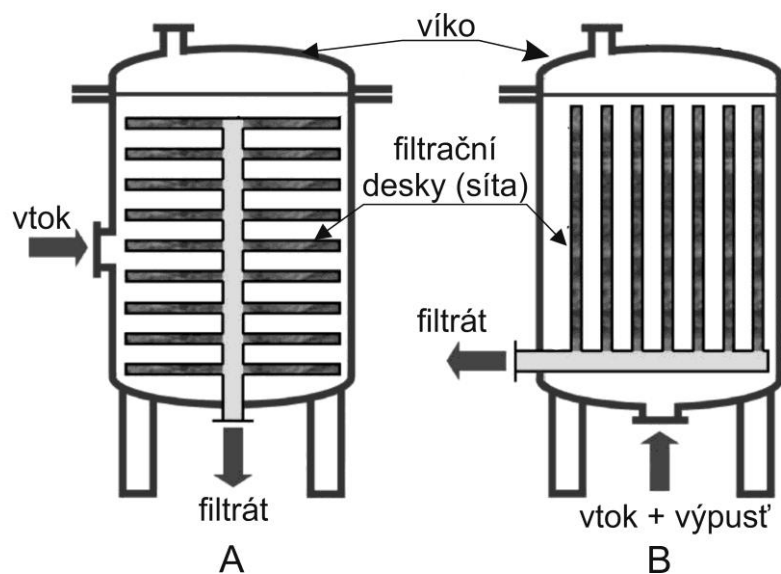
Listové filtry, někdy také pytlíkové filtry, tvoří filtrační plachetka sešitá do tvaru pytlíku. Pytlík je natažen na drenážní vložku, a tím vzniká list filtru. Suspenze je přiváděna na vnější stranu a filtrát je odváděn vnitřní stranou pytlíku. Vakuové provedení tohoto filtru sestává z hranaté nádoby se suspenzí, do které je ponořena sestava listů připojených společnou sběrnou trubkou. Podtlakem uvnitř sběrné trubky se odsává filtrát. Po vytvoření určité tloušťky koláče se sestava listů přenese do nádoby s mycí vodou a mírným přetlakem vzduchu je koláč odstraněn z plachetek. [3]



Obrázek 8: Schéma práce listového filtru s detailem na filtrační element [3]

Tlakové listové filtry používají menší počet listů a každý list je napojen na samostatnou výtokovou trubku. Je proto možné ventilem odstavit každý list samostatně a provést jeho výměnu bez přerušení filtrace. Toto uspořádání je velmi výhodné pro kontinuální provoz. Hranaté nádoby tlakových filtrů jsou vhodné z hlediska skladových zásob náhradních plachetek. Všechny plachetky sestavy jsou stejné a je třeba mít skladem pouze jeden typ. Záporem je tvar nádoby, který nedovoluje použití vyšších tlaků, nádoby jsou robustní, těžké a drahé. Válcové nádoby jsou vhodné i pro tlaky okolo 1 MPa, avšak u vertikálního sestavení listů je velký sortiment náhradních plachetek nevýhodou. Řešením jsou kruhové listy sestavené horizontálně.

Horizontální listové filtry jsou tvořeny z tlakové nádoby s centrálním dutým hřídelem, na kterém jsou nasazeny postupové kruhové filtrační články. Přívod nefiltrovaného piva je obvykle shora či zboku tlakové nádoby, dutým hřídelem je odváděno pivo filtrované. V horní části filtru jsou filtrační kotouče nejjemnější a postupně se zvyšuje jejich hrubost směrem ke spodní části filtru. Po ukončení filtračního cyklu se rotací za využití odstředivých sil odstraní použitá křemelina a filtr se dále myje a sanituje. Největší výhodou horizontálních síťových filtrů je nulová ztráta v protláčkách, dále nedochází k provzdušnění piva, změn pH a teploty. [3,4]



Obrázek 9: Schéma listového filtru

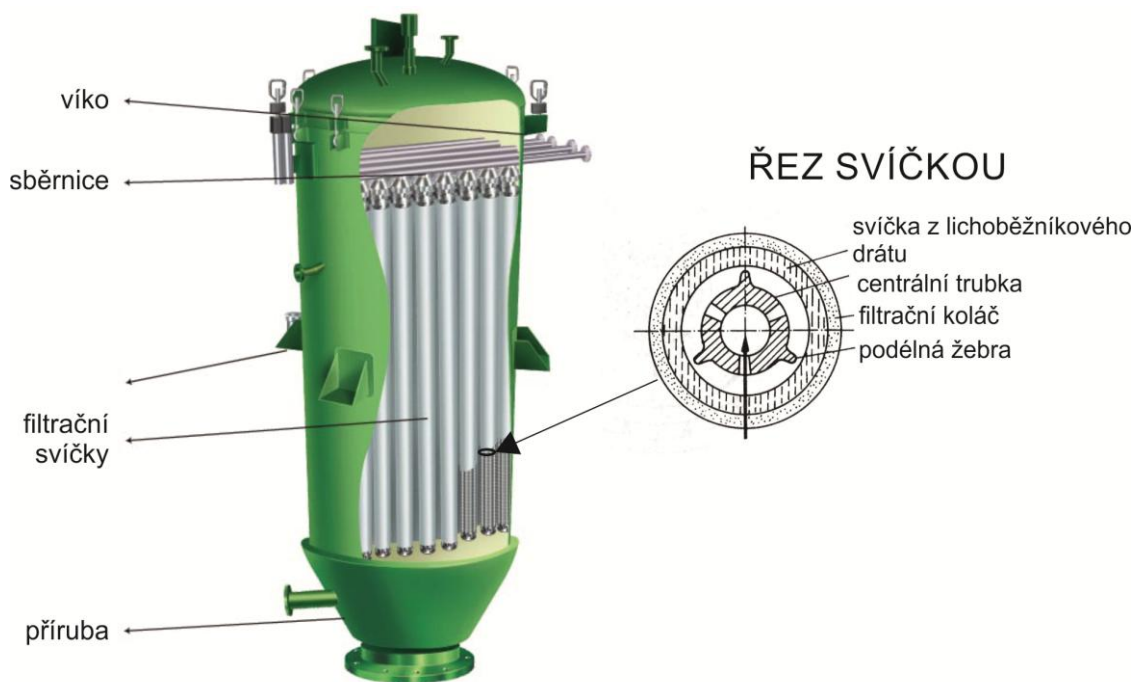
A - Horizontální uspořádání, B - Vertikální uspořádání [4]

3.7.2 Svíčkové filtry

Svíčkové filtry pracují obdobným způsobem jako listové filtry. Hlavním rozdílem je tvar filtračního elementu, kterým je zde porézní materiál ve tvaru dutého válce uzavřeného na jednom konci (svíčky). Sestava válců je poté uzavřena do tlakové nádoby a ponořena do filtrované suspenze. Na vnější povrch svíčky se nanáší křemelina a pod tlakem je suspenze tlačena směrem dovnitř svíčky. Vnitřními kanály svíček je filtrát odváděn do sběrače. Po ukončení filtračního procesu se koláč s křemelinou odstraňuje tlakovým vzduchem.

V pivovarech se využívá konstrukce perforované trubky 1 až 2 m dlouhé, na které je navinutý profilový lichoběžníkový drát nebo nasazeny drátové kroužky o průměru drátu 0,8 mm a průměru kroužku 25 mm. Vzniká mezi nimi štěrbina přesně stanovených rozměrů pohybující se kolem 50 μm .

U svíčkových filtrů není tloušťka filtračního koláče konstantní. S časem narůstá a tím se zvětšuje i její filtrační plocha. Svíčkové filtry tvoří přechod mezi povrchovou a hloubkovou filtrací. [1,3]

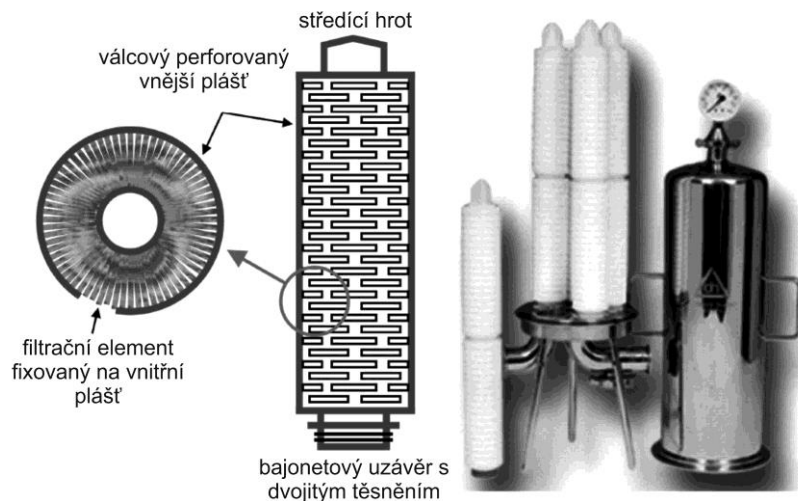


Obrázek 10: Schéma svíčkového filtru s řezem filtrační svíčky [3,7]

3.7.3 Modulové filtry

Modulové filtry jsou kompaktní, jednoduchá a snadno ovladatelná zařízení. Jsou schopny filtrovat suspenze s malou koncentrací částic s rozměry od 0,4 do 50 μm . Filtrační moduly jsou kruhové nebo kuželové a jsou tvořeny obvykle ze 40 elementů. Elementy jsou tvořeny filtrační vložkou, polystyrenovou podložkou a distanční vložkou. Filtrační cyklus končí, pokud je dosažen maximální tlakový spád. Filtrační segmenty se musí vyměnit nebo jsou vyčištěny zpětným proudem kapaliny.

Před modulové filtry je nutné předřadit jeden z výše popsaných filtrů a odfiltrovat velkou část kvasinek. Pro své vlastnosti velmi jemné filtrace se používají k dofiltraci piva, čímž se prakticky nahrazuje sterilizace piva pasterací. [1,4]



Obrázek 11: Modulový filtr s detailem filtračního elementu [4]

3.7.4 Zhodnocení konstrukcí koláčových filtrů

Pro srovnání výše uvedených konstrukčních variant koláčových filtrů jsem shrnul vybrané parametry do tabulky 1. Z důvodu odlišných velikostí filtračních zařízení jsem provedl přepočítání filtrační rychlosti na 1 m^2 . Kalolis filtruje s nejnižší rychlostí, avšak pro filtraci sladiny se hodí nejvíce z důvodu snadného čištění hrubých kalů z desek. Nejvyšší rychlostí filtruje modulový filtr, je však navržen k dofiltraci již zfiltrovaného piva konvenčními způsoby. Svíčkový filtr má oproti listovému pro stejnou filtrační plochu menší rozměry, proto se mi jeví v současnosti jako nejlepší volba pro malé a střední pivovary.

Tabulka 1: Přehled parametrů koláčových filtrů

KONSTRUKCE	Výkonnost [hl h ⁻¹]	Povrch filtru [m ²]	Výkonnost na m ² [hl m ⁻² h ⁻¹]	Velikost pórů [μm]	Maximální tlak [MPa]	Zdroj
Scezovací kád'	180	50	3,6	/	/	[1]
Kalolis	2	1,92	1,04	8	0,4	[11]
Vertikální listový filtr	2,8	2,78	10	40	1	[14]
Horizontální listový filtr	250	40,85	6,12	40	1	[1]
Svíčkový filtr	5	1,2	4,17	50	0,5	[11]
Modulový filtr	18	0,6	30	1	0,5	[13]

3.8 Zařízení pro hloubkovou filtraci

3.8.1 Pískové otevřené filtry

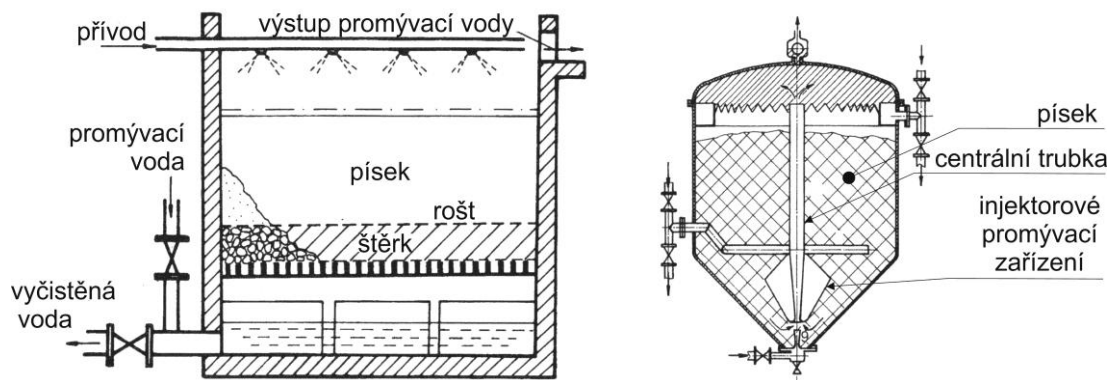
Otevřené pískové filtry jsou nejčastěji betonové nádoby zapuštěné v zemi. Odvod vyčištěné vody ze dna nádoby zajišťuje sestava trubek nebo kanálkových cihel. Filtrační vrstvu zde tvoří nejprve drenážní štěrkové vrstvy, dále pak vrstvy hrubého písku s postupně menší zrnitostí. Tloušťka jednotlivých drenáží se pohybuje od 5 do 30 cm. V horní části se nachází vlastní filtrační vrstva jemného písku o tloušťce 1m. Tato zařízení pracují pouze za konstantního hydrostatického tlaku suspenze a jsou velmi pomalá a rozměrná. Používají se především k úpravě pitné vody [3]

3.8.2 Pískové uzavřené filtry

Pískové uzavřené filtry pracují na rozdíl od otevřených s přetlakem. Rychlost průtoku výrazně vzroste a rozměry těchto filtrů již dovolují jejich použití v pivovarech.

Jedná se o válcové nádoby s kónickým dnem. Kapalina určená k filtraci je shora přiváděna a pod tlakem tlačena skrz filtr. Promývání písku uvnitř filtru je zajištěno injektorovým systémem umístěným ve střední části filtru. Při promývání se přivádí čistá voda v opačném směru výtokovým ventilem a navíc do injektorového systému.

Proud vody strhává písek do centrální trubky, písek se sesouvá směrem ke dnu a unášený písek centrální trubkou se zbavený nečistot ukládá na povrch filtrační vrstvy. Voda a kal odtékají ventilem z nádoby. Tato zařízení pracují obvykle s pneumaticko-hydraulickým mamutkovým čerpadlem za konstantního rozdílu tlaků. [3]



Obrázek 12 : Otevřený pískový filtr (vlevo), Uzavřený pískový filtr (vpravo) [3]

4 Návrh zařízení

Pro návrh filtračního zařízení malých a středních pivovarů jsem zvolil svíčkový filtr dle porovnání parametrů v odstavci 3.7.4. Pro výpočet tlakové ztráty vycházím z katalogových hodnot filtru FKS-1 společnosti Bílek filtry, s.r.o. Doporučený průtok filtrem je 0,4 až 0,6 m³·h⁻¹, volím tedy 0,5 m³·h⁻¹, po přepočtu 1,388·10⁻⁴ m³·s⁻¹. Pro dávkování křemeliny 1 kg·m⁻³ uvádí výrobce objem jednoho filtračního cyklu 5,5 m³ suspenze. V zařízení se nachází 10 filtračních svíček s průměrem 27 mm a délkou 1200 mm.

4.1 Vlastnosti látek

Pro výpočet tlakové ztráty svíčkového filtru jsem musel vyhledat vlastnosti křemeliny, piva a procesy, které probíhají ve svíčkovém filtru.

4.1.1 Křemelina

Křemelina patří mezi práškové filtrační materiály s rozměrem částic od 5 do 20 μm a hustotou přibližně 0,4 g/cm³. Hlavní složkou křemeliny je křemík, dále obsahuje železo, titan, hliník, vápník a to v různých koncentracích podle naleziště a úpravy. Tvoří tak na filtrační přepážce velmi účinnou filtrační vrstvu. Původ a velikost částic jsou velmi významným parametrem pro výpočet.

Tabulka 2: Druhy křemeliny dle původu [1]

Druh křemeliny	Barva	Průměr částic (μm)	Permeabilita (μm ²)	Použití
přírodní	žlutá, šedá	< 14	< 0,05	jen zřídka
	růžová	7 až 20	0,01-1,0	Druhý náplav, dávkování
kalcinovaná sodou	bílá	> 20	> 1,0	první náplav

Laboratorními zkouškami provedenými ve Výzkumném pivovarském a sladařském ústavu byly zjištěny charakteristiky křemelin výrobce Calofrig Borovany, které jsou i s podmínkami měření uvedeny v tabulce 3. Pro filtraci piva se využívá převážně křemelina F10, srovnatelná s Celite® FC-E amerického výrobce. Pro snížení provozních nákladů lze využít směs až 80% hrubé křemeliny F70 a 20% jemné křemeliny F10.

Syntetickou variantu křemeliny představila společnost Phenomenex Inc. před několika lety. Jedná se o uměle vyrobené destičky s 96 jamkami a rozměry částic 200 μm a 400 μm na bázi křemíku s pravidelným tvarem. Přináší výhody jako je konzistentní složení a vyšší rychlost filtrace. Používá se v laboratořích pro filtraci krevní plasmy a moči a představuje pokrok v oblasti filtrace. [1, 15]

Tabulka 3: Filtrační charakteristiky křemelin firmy Calofrig Borovany [8]

Dávkování křemeliny	1kg·m ²					
Filtrační plocha	140cm ²					
Označení křemelin	Průtočnost (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Specifický odpor (10 ¹¹ ·m ⁻²)	Objem za mokra (l·kg ⁻¹)	Permeabilita (μm ²)	Sypná hmotnost (g·cm ⁻³)	Použití
F4	15	377,0	3,00	0,027	0,247	Ostrá filtrace piva
F10	83	77,0	2,65	0,130	0,252	Ostrá filtrace piva
F20	148	39,0	3,00	0,257	0,222	Filtrace piva
F45	476	13,4	2,70	0,770	0,280	Filtrace piva
F50	456	15,4	2,45	0,649	0,299	Filtrace piva
F60	505	13,6	2,50	0,735	0,300	Předfiltrace piva
F70	630	10,1	2,70	0,990	0,295	Předfiltrace piva

4.1.2 Pivo

Nefiltrované pivo je suspenze kapaliny a kvasinek. Pro výpočet je třeba znát jejich množství a velikost. Důležitá je také dynamická viskozita piva. Pro výpočet filtru bylo zvoleno 10° nefiltrované pivo, jehož parametry jsou shrnuty v tab. 4.

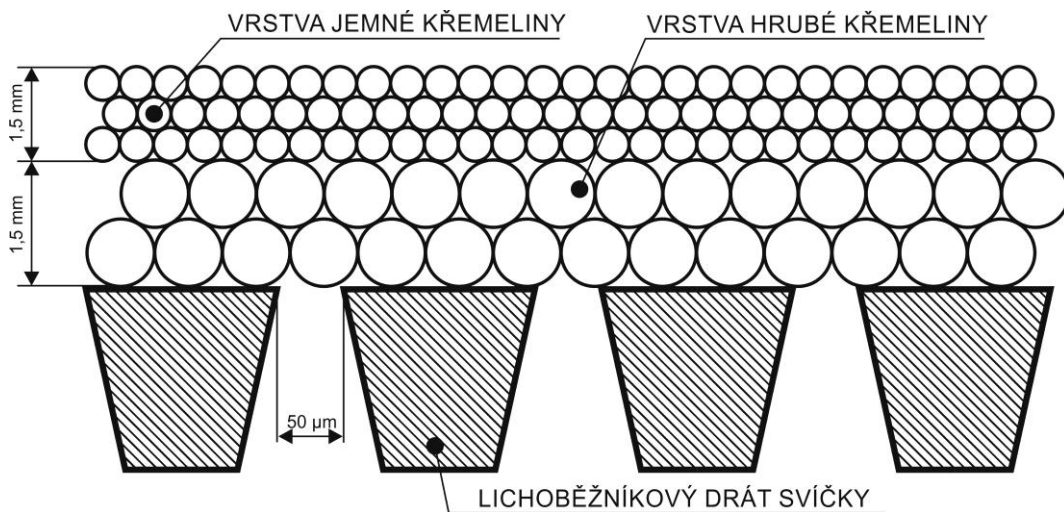
Tabulka 4: Výpočtové parametry 10° nefiltrovaného piva [9]

10° pivo	Dynamická viskozita (mPa·s)	Množství kvasinek (ml ⁻¹)	Velikost kvasinek (μm)	Čírost (EBC)
	1,42	0,28·10 ⁶	5	1,13

4.1.3 Svíčkový filtr

V pivovarství se nejvíce využívá konstrukce svíček z vinutého lichoběžníkového drátu. Mezi sousedními závitů je mezera $50\ \mu\text{m}$. Na dráty je v prvním naplavovacím režimu nanesena hrubá křemelina rozmíchaná ve vodě nebo zfiltrovaném pivu tvořící filtrační koláč o tloušťce $1,5\ \text{mm}$. Na ni je stejným způsobem nanesena vrstva jemné křemeliny o stejné tloušťce koláče. Nános dostatečně vysokého prvního a druhého náplavu nastane po 10 minutách cirkulace naplavovací vody s křemelinou. Při naplavování křemeliny nesmí dojít k tlakovým rázům, které by shodily vrstvu z filtru. Rovněž je třeba udržovat dostatečný průtok kapaliny filtrem, aby nedošlo k porušení koláče. Rovnoměrnost naplavené vrstvy zajistí kvalitní výsledek filtrace.

Po naplavení základní vrstvy je spuštěn režim filtrace piva. Do piva se před filtrem rozmíchává křemelina v množství $0,5\ \text{až}\ 1,5\ \text{kg/m}^3$, která postupně překrývá vrstvu zfiltrovaných kvasinek utvořenou na křemelinovém koláči a zajišťuje stále stejnou kvalitu filtrátu. Režim filtrace končí zpravidla při překročení povoleného tlakového spádu. [10, 11]



Obrázek 13: Schéma 1. a 2. náplavu na filtrační svíčke z profilového drátu [10]

Svíčkovými filtry lze dosáhnout velmi dobrých výsledků filtrace piva s čistotou $0,2\ \text{až}\ 0,6\ \text{EBC}$, výrobce Bílek Filtry, s.r.o. garantuje 5 kvasničných buněk na $100\ \text{ml}$ zfiltrovaného piva. Základem pro výpočet tlakové ztráty jsem zvolil parametry filtru FKS1 téže firmy.

4.2 Výpočet tlakové ztráty filtračního zařízení

Pro správný chod filtru je tlaková ztráta důležitým parametrem, pro který je třeba navrhnout hydrostatické čerpadlo. To musí pracovat v režimu konstantní filtrační rychlosti, aby křemelina tvořila na filtrační svíčke homogenní vrstvu. K výpočtu tlakové ztráty je třeba nejprve stanovit několik dílčích parametrů.

4.2.1 Porózita vrstvy křemeliny

Porózita vrstvy ε je definována jako poměr objemu pórů (mezer mezi částicemi křemeliny) k celkovému objemu vrstvy. Hodnoty jsem čerpal z tab. 3. Objem pórů V_p jsem vyjádřil jako rozdíl objemů vrstvy koláče V_V a objemu pevné fáze V_s . Hmotnost vzduchu v pórech vrstvy jsem zanedbal, a tak se hmotnost vrstvy koláče m_v a hmotnost pevné fáze m_s rovnají a můžu je z rovnice vykrátit. Sypnou hmotnost koláče křemeliny F10 ρ_V jsem čerpal z tab. 3, hustotu částic křemeliny ρ_s z odstavce 4.1.1. Rovnice je pak ve tvaru:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_V} = \frac{V_V - V_s}{V_V} = \frac{\frac{m_v}{\rho_V} - \frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_v}{\rho_V}} = \frac{\frac{1}{\rho_V} - \frac{1}{\rho_s}}{\frac{1}{\rho_V}} = \frac{\frac{1}{0,252} - \frac{1}{0,4}}{\frac{1}{0,252}} = 0,375 \quad (4.2-1)$$

4.2.2 Filtrační plocha

Výpočet filtrační plochy provedu jednoduše jako výpočet povrchu válce. Ve filtru je použito 10 svíček o průměru $D = 27$ mm a délce $l = 1200$ mm. Je třeba vypočítat povrch filtru S_{f0} před naplavením křemeliny, povrch filtru po naplavení první vrstvy hrubé křemeliny S_{f1} a povrch po naplavení druhé vrstvy jemné křemeliny S_{f2} . Výšku vrstvy prvního a druhého náplavu h_1 a h_2 čerpám z odstavce 4.1.3 a je rovná 1,5 mm.

$$S_{f0} = i\pi D l = 10 \cdot \pi \cdot 0,027 \cdot 1,2 = \mathbf{1,017m^2} \quad (4.2-2)$$

$$S_{f1} = i\pi[D + 2h_1]l \quad (4.2-3)$$

$$S_{f1} = 10 \cdot \pi \cdot [0,027 + 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}] \cdot 1,2 = \mathbf{1,131m^2}$$

$$S_{f2} = i\pi[D + 2(h_1 + h_2)]l \quad (4.2-4)$$

$$S_{f2} = 10 \cdot \pi \cdot [0,027 + 2(1,5 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3})] \cdot 1,2 = \mathbf{1,244m^2}$$

4.2.3 Výška filtračního koláče

Koláč při filtraci piva není konstantní, ale narůstá s časem. Pro výpočet tlakové ztráty ve filtru na konci filtrace je třeba znát výškový rozdíl, o který naroste koláč za jeden filtrační cyklus. Vycházím z objemu přimíchávané křemeliny, jež dostanu z dávkování křemeliny do nefiltrovaného piva c_m stanovené výrobcem na $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ po zfiltrování jednoho cyklu o objemu $V = 5,5 \text{ m}^3$ piva. Tento objem přidané křemeliny odpovídá objemu volně loženého koláče křemeliny na filtrační svíčke.

$$V \frac{c_m}{\rho} = S h (1 - \varepsilon) \quad (4.2-5)$$

Po úpravě rovnice (4.2-5) získám vztah pro výpočet výšky postupně narůstajícího koláče na konci filtračního cyklu:

$$h = \frac{V c_m}{\rho_V S_{f2} (1 - \varepsilon)} = \frac{5,5 \cdot 1}{400 \cdot 1,244 (1 - 0,375)} = \mathbf{0,0177 \text{ m}} \quad (4.2-6)$$

4.2.4 Maximální tlaková ztráta

Pro výpočet maximální tlakové ztráty na konci filtračního cyklu použijí upravený vztah pro průtok kapaliny porézní vrstvou, který se nazývá Darcyova rovnice:

$$\Delta p_z = \frac{1}{K} \mu h \bar{u} \quad (4.2-7)$$

Kde K představuje permeabilitu křemeliny, μ dynamickou viskozitu piva, h výšku koláče a \bar{u} střední rychlost toku piva. Tato rovnice platí pouze pro průtok nestlačitelným koláčem a plouživé proudění.

Střední rychlost toku filtrátu vyjádřím jako podíl průtoku suspenze filtrem

$\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, po přepočtu $\dot{V} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, z katalogu výrobce ku ploše filtru vypočtené v rovnici (4.2-4).

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{S_{f2}} \quad (4.2-8)$$

Při sériovém řazení se hydraulické odpory sčítají a celková tlaková ztráta je rovna součtu dílčích tlakových ztrát prvního náplavu křemelinou F70 Δp_{F70} , druhého náplavu křemelinou F10 Δp_{F10} a ztrátou v postupně narůstající vrstvě koláče také z křemeliny F10 Δp_k , jak je vidět v rovnici (4.2-9). Tlakové ztráty na filtrační přepážce lze zanedbat, jelikož částice křemeliny jsou až 10x menší, než otvory ve filtrační svíčke. Dosazením rovnice (4.2-8) do rovnice (4.2-7) a její úpravě dostanu následující vztah:

$$\Delta p_z = \Delta p_{F70} + \Delta p_{F10} + \Delta p_k \quad (4.2-9)$$

$$\Delta p_z = \frac{1}{K_1} \mu h_1 \frac{\dot{V}}{S_{f0}} + \frac{1}{K_2} \mu h_2 \frac{\dot{V}}{S_{f1}} + \frac{1}{K_2} \mu h \frac{\dot{V}}{S_{f2}} \quad (4.2-10)$$

Do rovnice (4.2-10) dosadím hodnoty permeability $K_1 = 9,90 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ pro křemelinu F70 a $K_2 = 1,30 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ pro křemelinu F10 z tabulky 3, viskozitu piva $\mu = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ z tabulky 4, výšku prvního a druhého koláče h_1 a h_2 znám z katalogu výrobce Bílek filtry, s.r.o., který ji uvádí jako 1,5 mm. Výšku postupně narůstajícího koláče na konci filtrace jsem vypočítal v rovnici (4.2-6), je rovná 17,7 mm. Filtrační plochy koláče jsem stanovil v odstavci 4.2.2.

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \frac{1}{9,90 \cdot 10^{-13}} \cdot 1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-4}}{1,017} + \\ &+ \frac{1}{1,30 \cdot 10^{-13}} \cdot 1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-4}}{1,131} + \\ &+ \frac{1}{1,30 \cdot 10^{-13}} \cdot 1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 17,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-4}}{1,244} = \mathbf{23\ 821\ Pa} \end{aligned}$$

4.2.5 Doba filtračního cyklu

Dobu filtračního cyklu t vyjádřím jako součet doby filtrace t_f a doby regenerace filtračních svíček t_s . Doba filtrace t_f je rovna podílu objemu jednoho filtračního cyklu V dělený průtokem piva filtrem \dot{V} . Doba regenerace t_s je součet doby potřebné pro odstranění použité křemeliny od svíček a její výplach, což je otázkou několika minut a následné naplavení nové křemeliny, kdy se každá vrstva naplavuje 10 minut. Dobu regenerace t_s tedy odhadnu na 1 hodinu, po přepočtu 3600 s. Doba filtračního cyklu je pak:

$$t = t_f + t_s = \frac{V}{\dot{V}} + t_s = \frac{5,5}{1,38 \cdot 10^{-4}} + 3600 = 43\ 200 \text{ s} \doteq \mathbf{12 \text{ h}} \quad (4.2-11)$$

Ve výpočtu tlakové ztráty mohlo dojít k nepřesnostem způsobeným zanedbáním stlačitelnosti koláče, zanedbáním tlakové ztráty ve filtrační svíčce a nepřesným údajem o hustotě křemeliny, jež se liší podle původu, složení a vlhkosti.

Filtr pracuje v režimu za konstantní filtrační rychlosti, je tedy třeba zvolit odpovídající čerpadlo vstupním a vypočteným parametrům. Pro účely filtrace piva s tlakovou ztrátou 24 kPa a filtrační rychlostí $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ volím nerezové hydrostatické čerpadlo s

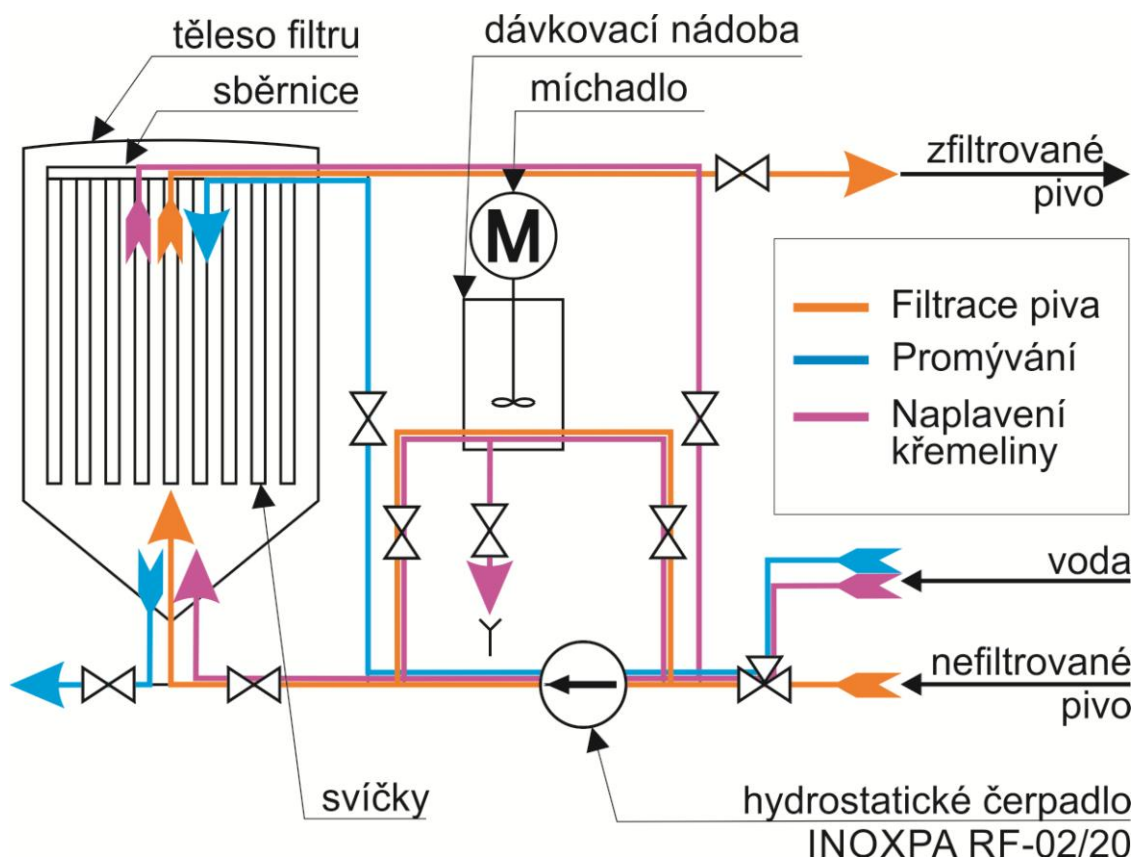
flexibilním oběžným kolem INOXPA RF-02/20. Technická specifikace čerpadla je shrnuta v tabulce 5.

Tabulka 5: Výkonnostní tabulka hydrostatického čerpadla s flexibilním oběžným kolem INOXPA RF-02/20 [12]

INOXPA RF- 02/20	Výkon [kW]	Průtok [m ³ /h]	Maximální provozní tlak [MPa]
		0,75	1,4

Čerpadlo je dle výpočtu předdimenzované. Výpočtem jsem však určil tlakovou ztrátu pouze ve filtračním koláči. Nejsou započítané tlakové ztráty v kolenech, ventilech a jiné ztráty.

Filtrační aparáty malých pivovarů jsou obvykle vyráběny jako pojízdné, aby byla možná jednoduchá manipulace a transport aparátu. Schéma takového aparátu jsem zpracoval v Obr. 14.



Obrázek 14: Schéma filtrační sestavy

5 Závěr

V první části práce jsem shrnul technologii výroby piva s důrazem na úseky, v nichž se provádí filtrace. Dále jsem podrobně rozebral filtrační technologie a filtry, které nejčastěji najdeme v pivovarech. Jsou to hrubé sladinové filtry a scezovací kádě a proti tomu velmi jemné hloubkové filtry pro úpravu vody na vstupu do pivovaru. Dále pak křemelinové listové a svíčkové filtry pro filtraci kvasinek z piva a modulové filtry pro dofiltraci a sterilizaci piva.

Pro návrh zařízení jsem si vybral svíčkový křemelinový filtr, který má v pivovarech dosud největší zastoupení díky své rychlosti, ceně a jednoduchosti. Vycházel jsem ze zařízení firmy Bílek filtry, s.r.o., která vyrábí filtrační systémy pro malé a střední pivovary. Na základě katalogových parametrů výrobce jsem stanovil výšku křemelinového koláče na konci filtračního cyklu. Dále jsem stanovil tlakovou ztrátu na konci cyklu, kterou výrobce ve svých materiálech neuvádí.

Pro vlastní pivovar bych určitě zvolil svíčkový filtr, kvůli jeho kompaktním rozměrům, příznivé pořizovací ceně aparátu, náhradních dílů a jednoduchosti obsluhy. Úskalí dalších druhů konvenčních filtrů vidím v jejich špatné automatizaci a nutnosti lidského zásahu a dále v množství potřebných náhradních dílů například u listových filtrů. Velmi zajímavou alternativou je membránová filtrace, jejíž rozšíření do komerční sféry je momentálně spíše hudbou budoucnosti.

6 Seznam použitých zdrojů

Knižní zdroje

- [1] BASÁŘOVÁ, Gabriela. ŠAVEL, Jan. BASAŘ, Petr a LEJSEK, Tomáš. *Pivovarství: teorie a praxe výroby piva*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 861 s. ISBN 978-80-7080-734-7
- [2] MIŠKOVSKÝ, Oldřich. *Pivo v láhvi*. 1.vyd.Praha:Noviny Praha, 1944
- [3] RIEGER, František. NOVÁK, Václav. JIROUT, Tomáš. *Hydromechanické procesy I*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03286-8
- [4] TARLETON, E.S. WAKEMAN, R.J. *Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design* 1.vyd. Elsevier Ltd. 2007, ISBN–13: 978-1-85-617421-3

Elektronické zdroje

- [5] Historie a proces vaření piva Pilsner Urquell [online katalog]. [vid. 2016-01-04].
Dostupné z:
http://www.prazdroj.cz/bartender07/download/PP_PU_Bart_Modul_1.pdf
- [6] Jak se vaří Budvar [online katalog]. [vid. 2016-01-04]. Dostupné z:
<http://www.budejovickybudvar.cz/produkty/jak-se-vari-budvar.html>
- [7] Katalog výrobce - svíčkový filtr [online katalog]. [vid. 2016-04-08]. Dostupné z:
<http://mectechfilters.co.in/Candle-Filter.html>
- [8] Testování křemeliny Calofrig F10 pro filtraci piva, VÚPS Praha [online časopis]. [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://kvasnyprumysl.net/download.php?clanek=554>
- [9] Využití laboratorních údajů k řízení výroby [online časopis]. [vid. 2016-04-12].
Dostupné z:
kvasnyprumysl.net/download.php?clanek=1600
- [10] Filtration in Lager and Smaller Breweries [online katalog]. [vid. 2016-04-12].
Dostupné z: <http://www.beveng.com/TEXT/MBAA08.pdf>
- [11] Katalog výrobce Bílek Filtry, s.r.o. - FKS1 [online katalog]. [vid. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://filtrace.com/>

[12] Katalog výrobce EBARA - AISI 304 [online katalog]. [vid. 2016-05-01].

Dostupné z: <http://www.ebara-cerpadla.cz/katalog-cerpadel-ebara.html>

[13] Katalog výrobce Pall Corporation [online katalog]. [vid. 2016-05-20].

dostupné z: <http://www.pall.com/main/food-and-beverage>

[14] Katalog výrobce Scott Laboratories [online katalog]. [vid. 2016-05-20].

dostupné z: <http://www.scottlab.com/uploads/documents/technical-documents/1076>

[15] New synthetic sorbent for SLE, The Scientist [online časopis]. [vid. 2016-05-20].

dostupné z: <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/41174>

7 SEZNAM SYMBOLŮ

c_m	Dávkování křemeliny	[kg/m ³]
D	Průměr filtrační svíčky	[m]
h	Výška koláče na konci filtračního cyklu	[m]
h_1	Výška koláče křemeliny F70	[m]
h_2	Výška koláče křemeliny F10	[m]
K	Součinitel propustnosti filtračního koláče	[m ²]
K_1	Součinitel propustnosti filtračního koláče F70	[m ²]
K_2	Součinitel propustnosti filtračního koláče F10	[m ²]
l	Délka svíčky	[m]
m_s	Hmotnost koláče	[kg]
m_v	Hmotnost pevné fáze koláče	[kg]
t_f	Doba vlastní filtrace	[s]
t_s	Doba regenerace filtru	[s]
t	Doba filtračního cyklu	[s]
S	Plocha	[m ²]
S_{f0}	Plocha filtrační svíčky	[m ²]
S_{f1}	Plocha filtrační svíčky po prvním náplavu	[m ²]
S_{f2}	Plocha filtrační svíčky po druhém náplavu	[m ²]
V	Objem jednoho filtračního cyklu	[m ³]
\dot{V}	Průtok filtrem	[m ³]
V_p	Objem pórů	[m ³]
V_s	Objem pevné fáze	[m ³]
V_v	Objem vrstvy křemeliny	[m ³]
\bar{u}	Střední rychlost	[m/s]
Δp_z	Celková laková ztráta	[Pa]
Δp_{F70}	Tlaková ztráta prvního náplavu křemelinou F70	[Pa]
Δp_{F10}	Tlaková ztráta prvního náplavu křemelinou F10	[Pa]
Δp_k	Tlaková ztráta koláče dávkované křemeliny F10	[Pa]
ε	Poróznost	[-]
μ	Dynamická viskozita	[Pa·s]
ρ_s	Hustota křemeliny	[kg/m ³]
ρ_v	Hustota vrstvy křemeliny	[kg/m ³]