

DOI: 10.18832/kp201823

Filtration of Beer – A Review

Filtrace piva – review

Martin SLABÝ, Karel ŠTĚRBA, Jana OLŠOVSKÁ
Research Institute of Brewing and Malting, Lípová 15, CZ 120 44 Praha 2
Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, a.s., Lípová 15, 120 44 Praha 2

Reviewed paper / Recenzovaný článek

Slabý, M., Štěřba, K., Olšovská, J., 2018: Filtration of beer – a Review. Kvasny Prum. 64(4): 173–184

This review deals with beer filtration, which is an important part of today's brewing technology. It describes the historical development of this separation technique, explains the basic definitions, methods of filtration using different filter materials, and specifies the haze particles of beer according to their size and physico-chemical properties. In addition to a general overview, it provides a summary of recent findings on the mechanism of filter fouling by yeast, colloidal particles, and macromolecules such as proteins or carbohydrates. Particular attention is paid to the influence of beta glucans, whose molecular weight, or their interactions with other beer components are more important than the total concentration. The review also contains information on ways to improve filtration efficiency, introduces new filter materials, and compares two of the most used filtration systems pre-coat filtration and membrane filtration in terms of sustainability and ecology.

Slabý, M., Štěřba, K., Olšovská, J., 2018: Filtrace piva – review. Kvasny Prum. 64(4): 173–184

Přehledový článek je věnován filtraci piva, která je v dnešní době důležitou součástí pivovarské technologie. Článek popisuje historický vývoj této separační techniky, vysvětluje základní pojmy, způsoby filtrace pomocí různých filtračních materiálů a specifikuje zákalotvorné částice piva podle velikosti a fyzikálně-chemických vlastností. Kromě obecného přehledu přináší souhrnné novodobé poznatky o mechanismu zanášení filtrů kvasinkami, koloidními částicemi, makromolekulami jako jsou proteiny nebo sacharidy. Zvláštní pozornost je věnována vlivu beta-glukanům, u nichž je při filtraci podstatnější jejich molekulová hmotnost, případně jejich interakce s dalšími složkami piva, než celková koncentrace. Článek dále obsahuje informace o způsobech zlepšení filtrace, představuje nové filtrační materiály a z hlediska udržitelnosti a ekologie srovnává dva nejvíce používané filtrační systémy, a to naplavovací a membránovou filtraci.

Keywords: beer filtration, kieselguhr filtration, membrane filtration, filterability

Klíčová slova: filtrace piva, naplavovací křemelinová filtrace, membránová filtrace, filtrovatelnost

1 INTRODUCTION

Beer filtration is an important step in preparation of beer for transportation and sale. Without filtration, it is almost impossible for most beers to ensure stability in the order of months. Without filtration, the shelf life of a lager with the original wort concentration of about 12% is about one to two months, even with ideal storage, i.e. at low temperatures (up to 5 °C) and no sunlight.

Filtration of finished beer should remove the haze-forming substances and produce a clear beer with increased biological and colloidal stability. This process must not reduce the foam stability of beer or lead to dissolution of oxygen, metals or other substances. The most important parts of the filtration are the porous filter septum and filter material. The filter material is added to the beer before entering the filter and is then retained on the filter septum to form a filtering layer. For membrane filtration, the filter septum is simultaneously filter material.

2 HISTORY OF FILTRATION

Beer filtration has begun to be used since the mid-19th century, when international trade was needed to ensure its transport at greater distances and competitiveness compared to other alcoholic beverages. Originally, simple cloths, wooden shavings or isinglass were used for filtration (note – the filtration wasn't so efficient as today). The end of the 19th century witnessed the introduction of the so-called *beaker filter for cotton-based* filtration material, which was widely used in the 50s of the last century and to a small extent is still used today. After World War II, the so-called pre-coat filtration was expanded, in which bulk materials, mainly kieselguhr earth and perlite, were used. In brewing, these materials were known and used earlier, but the machinery did not allow their use for main filtration. It did not change until the second half of the 20th century, when there was great progress in the field of kieselguhr filtration, together with the development of filtration equipment, process automation and cleaning. Currently, kieselguhr filtration is the most widely used beer filtration method worldwide.

Subsequently, the technology was developed of the so-called *post-filtration* by means of germ removing *EK plates*, which can achieve up to several months of stability without the need of pas-

1 ÚVOD

Filtrace piva je důležitým krokem při přípravě piva k transportu a prodeji. Bez filtrace je téměř nemožné u většiny piv zajistit trvanlivost v řádu měsíců. Trvanlivost ležáků o koncentraci původní mladiny okolo 12% je bez použití filtrace asi jeden až dva měsíce, a to i při ideálním skladování, tedy při nízké teplotě (do 5 °C) a bez přístupu slunečního světla.

Filtrací hotového piva by se z něho měly odstranit kalící látky za vzniku čirého piva se zvýšenou biologickou a koloidní trvanlivostí. Při tomto procesu nesmí docházet ke snížení pěnivosti piva nebo k rozpouštění kyslíku, kovů či dalších látek. Nejdůležitější součástí filtrace jsou porézní filtrační přepážka a filtrační materiál. Do piva se před vstupem do filtru přidává filtrační materiál, který je následně zadržen na filtrační přepážce, čímž se vytváří filtrační vrstva. U membránové filtrace je filtrační přepážka zároveň filtračním materiálem.

2 HISTORIE FILTRACE

Filtrace piva se začala používat od poloviny 19. století, kdy bylo zapotřebí s rozvojem mezinárodního obchodu zajistit jeho transport na větší vzdálenosti a konkurenceschopnost oproti ostatním alkoholickým nápojům. Původně se k filtraci, která nebyla zdaleka tak účinná tak jako dnes, používaly jednoduché plachetky, dřevěné hobliny či vyzina, na konci 19. století byl na trh uveden tzv. miskový *filtr na pivovarskou hmotu*, která se masově používala do 50. let minulého století a v malé míře se používá dodnes. Po druhé světové válce se rozšířila tzv. *naplavovací filtrace*, kde se využívaly sypké materiály, hlavně křemelina a perlit. V pivovarství byly tyto materiály známy a využívány již dříve, ale strojní vybavení neumožňovalo jejich použití pro hlavní filtraci. To se změnilo až v druhé polovině 20. století, kdy došlo k velkému pokroku v oblasti filtrace pomocí křemeliny, společně s vývojem filtračního zařízení, automatizací procesu a čištění. V současnosti je křemelinová filtrace nejpoužívanější filtrační metodou piva na světě.

Následně byla vyvinuta technologie, tzv. *dofiltrace piva pomocí odzáradkovacích EK desek*, pomocí které lze dosáhnout v závislosti na vstupním zatížení piva až několikaměsíční stability bez nutnosti pasterace. V některých zemích se lze také setkat s postupy separa-

teurization, depending on the input load of the beer. In some countries, yeast separation procedures can also be found using different types of *centrifuges*. This is a useful wasteless technology that is more energy-intensive and the beer thus prepared has a lower stability and clarity.

A totally different technology, which has been described in the 1960s, is in brewing increasingly used *membrane filtration*. Originally, this technology was used to produce sterile air, later to produce low-alcohol and non-alcoholic beer. Its advantage is a precisely defined pore size, which makes it possible to specifically remove molecules of a certain size. At present, it is mainly used for the post-filtration of beer as so-called cold pasteurization (sterile filtration).

In general, membrane filtration of beer in the brewing industry is on the rise, not only in Western Europe and America, but it is also used by some Czech breweries. It is an advantageous method not only from an ecological point of view, as it obviates the treatment of used kieselguhr, but also in terms of filtration efficiency. Its disadvantage is the high cost of acquiring new equipment and also new membrane elements. One of the variants used in Japan are so-called „ceramic candles“, which are used for sterile filtration (Basařová et al., 2010).

3 GENERAL TYPES OF FILTRATION

In general, the types of filtration can be divided by pore size as follows (see Fig. 1). Each type of filtration is therefore suitable for filtering particles of different sizes:

- standard filtration 1.000 – 10.000 nm
- microfiltration 100 – 1.000 nm
- ultrafiltration 10 – 100 nm
- nanofiltration 1 – 10 nm
- reverse osmosis < 1 nm

3.1 Fouling particles

The fouling particles or substances which are separated from the beer during filtration are generally made up of substances of a dual nature and based on their size they can be divided into:

1. micro-organisms (yeasts and partially bacteria);
2. haze-forming particles (proteins, polyphenols, condensed polyphenols and other substances). The solubility of these substances decreases with decreasing temperature and they form in the beer the so-called “chill haze”.

The fouling particles are captured on the filtering material based on three basic principles. On the sieve principle, the largest particles are trapped on the surface of the filtration layer and smaller particles that are trapped in the pores of the filtration layer; the smallest particles are adsorbed on the inner walls of the pore of the filtration layer where electrostatic interactions or chemical bonds are also applied.

Colloidal particles (high molecular weight proteins) are removed from the beer with much more difficulty, especially due to their size, which is less than 0.1 μm . These particles are partially adsorbed on the trapped particles on the filtration layer while their larger proportion passes through the filter.

Blocking of the filtration layer is due to fouling particles that block the pores of the filter material, thereby reducing the filtering surface

ce kvasnic pomocí různých typů *odstředivek*. Jedná se o výhodnou bezodpadovou technologii, která má vyšší energetickou náročnost a pivo takto připravené má nižší trvanlivost a čírost.

Zcela odlišnou technologií, která byla popsána již v 60. letech minulého století, je v pivovarství stále více používaná *membránová filtrace*. Původně se tato technika v pivovarství používala k výrobě sterilního vzduchu, později k výrobě nízkoalkoholického a nealkoholického piva. Její výhodou je přesně vymezená velikost pórů, díky čemuž lze specificky odstraňovat molekuly o určité velikosti. V současnosti se používá zejména pro dofiltraci piva jako tzv. studená pasterace.

Obecně lze říci, že je membránová filtrace piva v pivovarském průmyslu na vzestupu, a to už nejen v západní Evropě a Americe, ale je využívána i některými českými pivovary. Jedná se o výhodnou metodu nejen z hlediska ekologického, neboť odpadá zpracování použité křemeliny, ale také z hlediska účinnosti filtrace. Její nevýhodou je finanční náročnost na pořízení nového zařízení a také na nové membránové elementy. Jednou z variant používanou v Japonsku jsou tzv. „keramické svíčky“, které se používají pro sterilní filtraci (Basařová et al., 2010).

3 TYPY FILTRACE OBECNĚ

Obecně lze typy filtrace rozdělit podle velikosti pórů následovně (obr. 1). Každý typ filtrace je tedy vhodný pro filtraci částic různé velikosti:

- standardní filtrace 1000–10000 nm
- mikrofiltrace 100–1000 nm
- ultrafiltrace 10–100 nm
- nanofiltrace 1–10 nm
- reverzní osmóza < 1 nm

3.1 Kalové částice

Kalové částice neboli látky, které jsou z piva při filtraci oddělovány, jsou obecně tvořeny látkami dvojího charakteru a lze je podle velikosti rozdělit na:

1. mikroorganismy (kvasinky a částečně bakterie);
2. zákalotvorné částice (bílkoviny, polyfenoly, kondenzované polyfenoly a další látky). U těchto látek klesá rozpustnost s klesající teplotou a tvoří v pivu tzv. „chladový zákal“.

Kalové částice se zachycují na filtračním materiálu na základě tří základních principů. Na principu síta jsou zachycovány největší částice na povrchu přepážky, menší částice se zachycují v pórech filtrační přepážky a nejmenší částice, jsou adsorbovány na vnitřní stěny pórů filtrační přepážky, kde se již uplatňují elektrostatické interakce nebo chemické vazby.

Koloidní částice (vysokomolekulární bílkovinné štěpy) se odstraňují z piva mnohem obtížněji, zejména kvůli jejich velikosti, která je menší než 0,1 μm . Tyto částice se částečně adsorbují na zachycené částice na filtrační přepážce, jejich větší podíl přepážkou prochází.

Ucpávání filtrační vrstvy je způsobeno kalovými částicemi, které zanášejí póry filtračního materiálu, tím zmenšují filtrační plochu a snižují průtok. Tento jev je viditelný hlavně u filtrací bez dávkování filtračního materiálu tedy u deskové a membránové filtrace. Ovšem i při křemelinové filtraci či *cross flow* filtraci (viz dále) dochází k pomalému zanášení filtrační vrstvy, protože drobné kalové částice

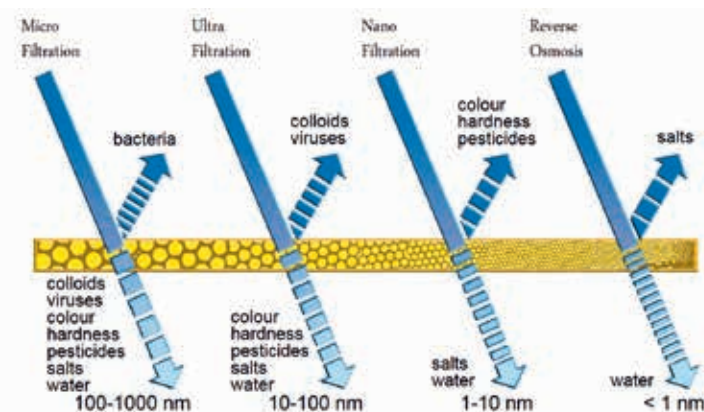
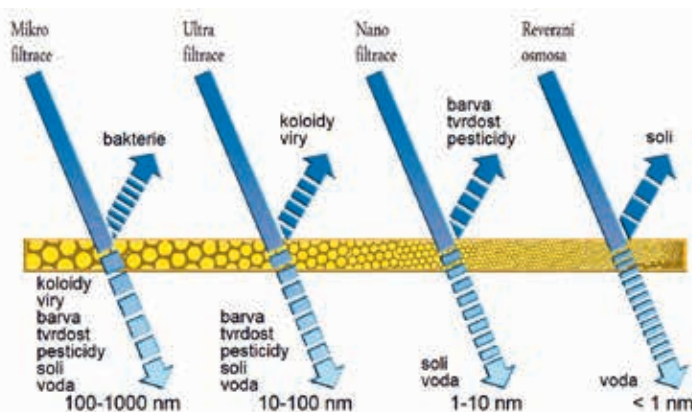


Fig. 1 Types of filtration according to membrane pore size (published courtesy of Pentair)



Obr. 1 Typy filtrace podle velikosti pórů membrány (publikováno s laskavým svolením firmy Pentair)

and reducing flow. This phenomenon is mainly visible in filtration performed without dosing of the filtration material, i.e. in plate and membrane filtration. However, even with kieselguhr filtration or crossflow filtration (see below), the filtration layer is slowly blocked because small fouling particles penetrate into this layer. The high resistance of the filter layer is also due to particles of bitter substances that have not been removed during the fermentation process. A small amount of yeast which is absorbed by some colloids to form a coarser filter layer can improve filterability (Masák et al., 1988). The problem of blocking and fouling of the filter layer is described in more detail below.

4 FILTERS

The most important part of filtration is the porous filter material. The filter material is applied prior to the filtration of beer on filter septum as well as to unfiltered beer. The dosed filter material is then retained on the filter septum, thereby expanding the filter layer.

4.1 Filter material

Filter materials are divided into three basic groups:

1. fibrous (cotton-based filtration material, synthetic fabrics, cellulose);
2. granular and powdered (kieselguhr, perlite, combined material with cellulose fibers, silica gel, activated carbon);
3. porous (plastic, metal or ceramics membranes).

The physical quantity "Effective Bed Voidage" (EBV) is used to define the technologically usable porosity determined for bulk filter materials. It is expressed as a volume fraction (% vol). The EBV is used to make correction for the voidage within the filter due to small pores.

4.1.1 Cotton-based filtration material

Cotton-based filter material is one of the oldest filter materials and is currently practically no longer used. It is prepared from defatted and cleaned cotton waste. The obtained mass is compressed into cakes having a diameter of 50–55 cm and a thickness of 5–6 cm. These cakes are inserted into the filter. The advantage of this material is the large volume of beer filtered during one run. The disadvantage is a very laborious regeneration of filter cakes and considerable loss of beer. Asbestos was added to the cotton-based material for a sharper filtration.

4.1.2 Synthetic fabrics

Synthetic fabrics are very similar to the cotton-based material, their disadvantage is their more demanding disposal.

4.1.3 Kieselguhr

Kieselguhr is the most widely used filter material in brewing. It comes from freshwater or marine diatoms, which include more than 15,000 species with very different shapes. Probably a change of climate has resulted in their mass extinction, creating up to 300 m thick layers of silicate frustules from which kieselguhr is being prepared. The largest sites are in the US in California. (Kahler and Voborský, 1981). The mined kieselguhr is modified in the following ways:

1) *Calcination*, which is used for kieselguhr earths with lower iron content. The smallest particles of kieselguhr are fused together using a melting agent (sodium carbonate, sodium chloride) at a high temperature up to 1,200 °C. This significantly increases the flow rate. Kieselguhr from high-quality deposits does not need to be calcined at such high temperatures and is only processed at lower temperatures (about 800 °C) along with mechanical adjustments to remove organic residues.

2) *Wet treatment*, which is more expensive and time-consuming, is used for kieselguhr with high iron content. Iron is removed using inorganic acids, most often hydrochloric acid. This is followed by drying, calcination and sorting by size. After the treatment, kieselguhr is checked for iron content and other potentially contaminating elements (e.g. calcium, aluminum, arsenic).

The kieselguhr is divided according to the particle size to a coarse fraction used as the base layer to a fine fraction, which is added to the course kieselguhr to obtain a clear filtrate (see Table 1). The rule is that the finer the kieselguhr, the lower the permeability of the layer and the filtration efficiency. On the other hand, the filtration is sharper and the beer clarity is higher. The advantage of kieselguhr as filter material is its inertness towards beer and a high porosity; 1 g of kieselguhr has the porosity of up to 20 m². The disadvantage of kiesel-

guhr is that it does not filter out fine particles. High resistance of the filter layer is also caused by particles of bitter substances that have not been removed during the fermentation process. A small amount of yeast which is absorbed by some colloids to form a coarser filter layer can improve filterability (Masák et al., 1988). The problem of blocking and fouling of the filter layer is described in more detail below.

4 FILTRY

Nejdůležitější součástí filtrace je porézní filtrační přepážka a filtrační materiál. Filtrační materiál je nanášen před vlastní filtrací piva na filtrační přepážku a zároveň se zrnitý filtrační materiál přidává do nefiltrovaného piva. Dávkovaný filtrační materiál je následně zadržán na filtrační přepážce a tím se rozšiřuje filtrační vrstva.

4.1 Filtrační materiál

Filtrační materiál se rozděluje do tří základních skupin:

1. vláknitý (pivovarská hmota, syntetické tkaniny, celulóza);
2. zrnitý a práškový (křemelina, perlity, kombinovaný materiál s celulosovými vlákny, silikagel, aktivní uhlí);
3. pórovitý (membrány z plastu, kovu nebo keramiky).

Pro zpřesnění určení technologicky využitelné pórovitosti u sypkých filtračních materiálů se používá fyzikální veličina „účinný volný prostor“ (EBV), který je vyjadřován jako objemový zlomek (% obj.). Pomocí EBV se koriguje nevyužitelné místo pro filtraci v malých pórech.

4.1.1 Pivovarská hmota

Pivovarská hmota patří mezi nejstarší filtrační materiály a v současné době se již prakticky nepoužívá. Připravuje se z odučněných a vyčištěných bavlněných odpadů. Získaná hmota se lisuje do koláčů o průměru 50–55 cm a tloušťce 5–6 cm. Tyto koláče se vkládají do filtru. Výhodou tohoto materiálu je velký filtrační objem piva zfiltrovaný během jednoho běhu. Nevýhodou je velmi pracná regenerace filtračních koláčů a značné ztráty piva. Pro ostřejší filtraci se do pivovarské hmoty přidával azbest.

4.1.2 Syntetické tkaniny

Syntetické tkaniny jsou velice podobné pivovarské hmotě, jejich nevýhodou je náročnější způsob jejich likvidace.

4.1.3 Křemelina

Křemelina je nejrozšířenějším filtračním materiálem v pivovarnictví. Pochází ze sladkovodních nebo mořských rozsivek, kterých se rozlišuje více než 15 000 druhů s velmi odlišnými tvary. Pravděpodobně změnou klimatu došlo k jejich hromadnému vymírání a vytvořily se až 300 m silné vrstvy křemičitých schránek, ze kterých se křemelina připravuje. Největší naleziště jsou v USA v Kalifornii. (Kahler a Voborský, 1981). Těžena křemelina se upravuje těmito způsoby:

1) *Kalcinací*, která se používá pro křemeliny s nižším obsahem železa, kdy se za pomoci tavidla (uhlíčan sodný, chlorid sodný) při vysoké teplotě až 1200 °C nejmenší částice křemeliny staví dohromady. Tím se výrazně zvýší její průtočnost. Křemelinu z kvalitních ložisek není potřeba kalcinovat při takto vysokých teplotách, upravuje se pouze při teplotách nižších (asi 800 °C) spolu s mechanickými úpravami pro odstranění organických zbytků.

2) *Úprava mokrou cestou*, která je finančně i časově náročnější, se používá pro křemeliny s vysokým obsahem železa. To je odstraňováno anorganickými kyselinami, nejčastěji kyselinou chlorovodíkovou. Poté následuje sušení, kalcinace a třídění podle velikosti.

Po úpravě je křemelina kontrolována na obsah železa a dalších případných kontaminujících prvků (např. vápník, hliník, arsen). Opakovaně je před použitím do piva kontrolována na obsah železa.

Křemelinu dělíme podle velikosti částic na hrubou, používanou jako základní naplavovací vrstvu až po jemnou, kterou přidáváme k hrubým křemelínám pro získání čirého filtrátu (tab. 1). Platí zde závislost, že čím je křemelina jemnější, tím se snižuje prostupnost vrstvy a klesá filtrační výkon, naopak filtrace je ostřejší a pivo jiskrnější.

Výhodou křemeliny jako filtračního materiálu je její inertnost vůči pivu a vysoká porozita; 1 g křemeliny má porozitu až 20 m². Nevýhodou křemeliny je její jednorázové použití, které se projevuje v nákladech na likvidaci a v zátěži na životní prostředí, jak bude diskutováno dále v textu.

guhr is its one-time use, which is reflected in the cost of its disposal and the environmental burden. This will be discussed later in the text.

Table 1 Current flow rates of kieselguhr

| Kieselguhr | Flow rate l*min ⁻¹ *m ² |
|------------|---|
| Coarse | +450 |
| Average | 100 – 300 |
| Fine | -50 |

4.1.4 Perlite

Perlite is a product made of silicates of volcanic origin with a certain proportion of bound water or volcanic glass. After grinding and sorting, it is heated rapidly to about 850 °C. The water contained in it is released during the heat treatment and the perlite increases in volume up to 30 times and turns into a product with a porous structure. It is then ground and sorted by particle size. It is mainly used for filtering sweet worts and worts because iron and calcium can be released at low pH. Perlite is also used as a base for filtering beer instead of coarse kieselguhr or a mixture thereof.

The advantage of perlite is higher flow rate and permeability relative to kieselguhr, disadvantages are lower filtering capacity than that of kieselguhr, iron and calcium release and lower filtration sharpness. (The degree of filtration sharpness is determined by the size of the filtration layer, the pores of the filtration layer, and the amount and properties of the fouling particles) (Basařová et al., 2010).

4.1.5 Activated carbon

Activated carbon is a highly porous carbon in the form of graphite plates with large surface (500-1200 m²/g). Depending on its modification it is commonly used in water purification to capture a number of organic and inorganic pollutants. In brewing, it can be used to reduce the content of polyphenols, nitrogen compounds, color substances, bitter substances and harsh taste substances. A decrease in the content of substances produced by lipid oxidation was observed during its use in wort filtration (Bhatnagar et al., 2013; Yano et al., 2008).

4.2 Filter septa

Filter septa are very heterogeneously designed due to differences in the design of filters and filter materials used. They are used for all types of filtration and serve as a base structure for the application of powder and fibrous filter materials. The exception is membrane filtration. For membranes, the septum is also a filter material. Filter septum materials can be divided as follows:

1. sieves or filter candles (stainless steel or slotted wire mesh);
2. filter sheets (metal, polypropylene or textile fibers);
3. filtration plates (cellulose, cotton, kieselguhr, perlites, glass fibers);
4. membranes (polyethylene, polyacrylate, polyurethane, polyamide, polyethersulfone PES).

4.2.1 Sieves or filter candles

Sieves or filter candles are assembled by winding a profiled wire or by assembling fine discs with surface patterns on a stainless steel support base. Filtering slots are formed in this way.

4.2.2 Filter sheets

Filter sheets are made of stainless steel, polypropylene or fabric. Stainless steel sheets are used for the filtration of wort and beer, textile sheets are used for sweet wort. Polypropylene sheets are suitable for all three matrices.

4.2.3 Filter plates

Filter plates are made of cellulose, cotton or other materials and may contain a kieselguhr. They have either the function of a supporting structure, most often for kieselguhr, or the filter material itself. The support plates serve similarly to filter candles as a basis for forming a filter layer. Their pores are an order of magnitude larger than the fouling particles. Plates used directly for filtration are most commonly made from cellulose with the addition of kieselguhr. Sometimes, stabilizers are also added. The filter plates have a defined mean pore diameter that ranges from 15 to 0.2 μm.

4.2.4 Membranes

The membranes used for beer filtration consist mainly of plastic materials such as polyethersulfone, nylon and polypropylene with a pore size of 10 to 0.2 μm. Due to their physical properties, they

Tab.1 Běžné hodnoty průtočnosti křemeliny

| Křemelina | Průtočnost l*min ⁻¹ *m ² |
|-----------|--|
| Hrubá | +450 |
| Střední | 100 – 300 |
| Jemná | -50 |

4.1.4 Perlit

Perlit je produkt vyrobený z křemičitanů vulkanického původu s určitým podílem vázané vody neboli vulkanického skla. Po rozemletí a třídění se prudce zahřeje na cca 850 °C. Obsažená voda se při tepelné úpravě uvolňuje a perlit zvětšuje objem až 30krát a změní se na produkt s pórovitou strukturou. Poté se rozemele a třídí podle velikosti částic. Používá se převážně na filtraci sladín a mladín, protože při nízkém pH může uvolňovat železo a vápník. Perlit se také používá jako základní náplav pro filtraci piva místo hrubé křemeliny nebo ve směsi s ní.

Výhodou perlitu je vyšší průtočnost a prostupnost, než má křemelina, nevýhodami jsou nižší filtrační schopnost oproti křemelíně, uvolňování železa a vápníku a nižší ostrost filtrace, než vykazuje křemelina. (Míra ostrosti filtrace je dána velikostí filtrační vrstvy pórů filtrační vrstvy, množstvím a vlastnostmi kalických částic) (Basařová et al., 2010).

4.1.5 Aktivní uhlí

Aktivní uhlí je vysoce porézní uhlík ve formě grafitových destiček s velkým povrchem (500 – 1200 m²/g). Běžně se používá při čištění vody k zachytu řady organických i anorganických polutantů v závislosti na jeho modifikaci. V pivovarství jej lze použít ke snížení obsahu polyfenolů, dusíkatých sloučenin, barvy, hořkých látek a látek způsobujících drsnou chuť. Při jeho použití při filtraci mladiny byl pozorován pokles obsahu látek vznikajících oxidací lipidů (Bhatnagar et al., 2013; Yano et al., 2008).

4.2 Filtrační přepážky

Filtrační přepážky jsou konstruovány velmi různorodě vzhledem k rozlišenosti v konstrukci filtrů a použitých filtračních materiálů. Filtrační přepážky se používají u všech typů filtrace. Slouží jako podkladová konstrukce pro nanášení zrnitých a vláknitých filtračních materiálů. Výjimkou je membránová filtrace. U membrán je přepážka zároveň filtračním materiálem. Materiály filtračních přepážek lze rozdělit následovně:

1. síta nebo filtrační svíčky (nerezový drát nebo šterbinová síta z profilovaného drátu);
2. plachetky (kovová, polypropylenová nebo textilní vlákna);
3. filtrační desky (celulóza, bavlna, křemelina, perlit, skleněná vlákna);
4. membrány (polyethylen, polyakrylát, polyuretan, polyamid, polyethersulfon PES).

4.2.1 Síta nebo filtrační svíčky

Síta nebo filtrační svíčky jsou sestaveny navinutím profilovaného drátu nebo sestavením jemných kotoučků s prolisy na nosném základu z nerezavějící oceli. Tímto způsobem jsou vytvořeny filtrační šterbiny.

4.2.2 Plachetky

Plachetky jsou vyrobeny z nerezové oceli, polypropylenu či textílie. Pro filtraci mladiny a piva jsou používány plachetky nerezové, pro sladinu plachetky textilní. Polypropylenové plachetky jsou vhodné pro všechny tři matrice.

4.2.3 Filtrační desky

Filtrační desky jsou vyrobeny z celulosy, bavlny anebo dalších materiálů a mohou obsahovat příměs celulosy. Tyto desky mají buď funkci nosné konstrukce, nejčastěji pro křemelinu, nebo vlastního filtračního materiálu. Nosné desky slouží podobně jako filtrační svíčky jako základ pro vytvoření filtrační vrstvy. Jejich póry jsou řádově větší než kalové částice. Desky sloužící přímo k filtraci jsou nejčastěji vyrobeny převážně z celulózy s přídavkem křemeliny. Někdy jsou přidávány i stabilizační prostředky. Filtrační desky mají definovaný střední průměr pórů, který se pohybuje od 15 do 0,2 μm.

4.2.4 Membrány

Membrány používané pro filtraci piva jsou tvořeny zejména plastovými materiály jako polyethersulfon, nylon a polypropylen s velikostí pórů od 10 do 0,2 μm. Díky svým fyzikálním vlastnostem zachycují pivo kazící mikrobiální organismy a zároveň nemění charakter piva.

capture the beer spoilage microorganisms, while not changing the character of beer.

4.3 The most common types of filtration

4.3.1 Pre-coat kieselguhr filtration

The most important step of the pre-coat kieselguhr filtration is the correct combination of kieselguhr with different particle size for the pre-coat. The first pre-coat is a layer of kieselguhr applied on the filter elements before the start of the filtration itself and is usually composed of two layers:

1. a mixture of coarse and possibly fine kieselguhr forming a support layer of kieselguhr

2. a mixture of the same composition as the kieselguhr dosed during filtration, with a higher percentage of fine/medium kieselguhr

A mixture of kieselguhr for pre-coat and beer dosing is prepared either by mixing with degassed water or in a pressurized vessel with beer to avoid carbon dioxide loss. The aim is to apply a compact layer of 1-4 mm thick kieselguhr to the filter septum. During the filtration, kieselguhr is added to the unfiltered beer in the amount of 50–120 g/hL in the form of a solution as during the second pre-coat.

Depending on the type of fixed support, the pre-coat filters are divided into three basic types:

1. Plate filter. Plate filters, which have been used worldwide since the 1950s, are now being replaced by newer technologies and can be found only exceptionally, more often in post-Soviet republics. The first industrially manufactured kieselguhr filters were formed by nylon filter septa or a FILTODUR®, which is still used today. Influx frames have been added between the filtering frames to provide a space for sediment the kieselguhr. The flow of filtered beer could be varied by the number of frames inserted. Kieselguhr consumption is 50–80 g/hL (Juillerat, 1952). The advantage of plate filters is their versatility for a wide range of applications. The regular filter area is up to 300 m² depending on the number of frames. The disadvantage of this filter technology is higher losses of beer and more waste. (Moll, 1994).

2. Sieve filter. The filter and carrier support of a sieve filter are made of a metal sieve with a perforated metal foil or plate. The filter can be both horizontal and vertical. The pore size of the sieve ranges from 40 to 120 µm, with an average of 80 µm. The filters are designed to a pressure up to 1 MPa and the thickness of the filter cake is 1.5-3 cm, which corresponds to 500-1000 g/m².

Vertical filters are mainly used for pre-filtration of beer and their advantage is long service life, but they are used less and less. On the other hand, horizontal filters are increasingly used along with candle filters, as they have a number of advantages over vertical filters. These are especially a small extract loss in pre-runs due to the emptying of the pre-coated filter by CO₂, as well as the avoidance of aeration of beer, changes in pH and temperature. This method of filtration is also often used to stabilize beer. Removal of kieselguhr or stabilizer from the filter during the cleaning is accomplished by rotation of the filter cells by means of centrifugal force.

3. The candle filter is currently the most used filter type (Fig. 2). Candle filters work in a similar way to sieve filters. The main difference is the shape of the filter element, which is a porous material in the form of a hollow cylinder (candle) closed at one end. The breweries use a perforated pipe construction 1 to 2 m long, which corresponds to the filtering surfaces of 0.13 to 1.30 m² (Moll, 1994), on

4.3 Nejběžnější typy filtrací

4.3.1 Naplavovací křemelinová filtrace

Nejdůležitějším krokem naplavovací křemelinové filtrace je správná kombinace křemelin s různou průtočností pro základní náplav. Základní náplav je vrstva křemelin nanesená na filtrační elementy před začátkem vlastní filtrace a je obvykle složen ze dvou vrstev:

1. směs hrubé a případně jemné křemelin – tvoří nosnou vrstvu křemelin;

2. směs o stejném složení jakou má křemelin dávkovaná během filtrace – vyšší podíl jemné/střední křemelin.

Směs křemelin pro náplav i dávkování do piva se připravuje buď smícháním s odplyněnou vodou, nebo v tlakové nádobě s pivem, aby nedošlo ke ztrátě oxidu uhličitého. Cílem je na filtrační přepážku nanést kompaktní vrstvu křemelin o tloušťce 1–4 mm. V průběhu filtrace je do nefiltrovaného piva přidávána křemelin, v množství 50–120 g/hl, ve formě roztoku stejně jako při naplavování.

Podle typu pevné přepážky se naplavovací filtry rozdělují na tři základní typy:

1. Deskový filtr. Deskové filtry, které byly celosvětově používány od 50. let, již ustupují do pozadí novějším technologiím a lze je nalézt už jen výjimečně, více ještě v postsovětských republikách. První průmyslově vyráběné provozní křemelinové filtry byly tvořeny filtračními přepážkami z nylonové tkaniny nebo FILTODUR®, který se používá dodnes. Do filtru byly zařazeny mezi nosné přepážky přítočkové rámy, čímž se získal prostor pro naplavení křemelin. Průtok filtrovaného piva bylo možno měnit počtem vložených rámu. Spotřeba křemelin je 50–80 g/hl (Juillerat, 1952). Výhodou deskových filtrů je jejich univerzálnost pro široké spektrum použití. Běžná filtrační plocha je podle počtu rámu až 300 m². Nevýhodou této filtrační technologie jsou vyšší ztráty a více odpadů (Moll, 1994).

2. Síťový filtr. Filtrační a nosnou přepážku síťového filtru tvoří kovové síto s perforovanou kovovou fólií či deskou. Filtr může být jak horizontální, tak vertikální. Velikost pórů síta se pohybuje v rozmezí 40 až 120 µm, v průměru 80 µm. Filtry jsou konstruovány na tlak až 1 MPa a tloušťka filtračního koláče je 1,5–3 cm, což odpovídá náplavu 500 až 1000 g/m².

Vertikální filtry se používají zejména na předfiltraci piva a jejich výhodou je dlouhá doba provozu, jsou však používány stále méně. Naopak filtry horizontální jsou spolu se svíčkovými filtry používané stále častěji, neboť mají v porovnání s vertikálními filtry řadu předností. Je to zejména menší ztráta extraktu v protlačkách z důvodu vytlačování náplavu pomocí CO₂, dále pak zamezení provzdušnění piva, změň pH a teploty. Tento způsob filtrace je často využíván také při stabilizaci piva. Odstranění křemelin nebo stabilizačních prostředků z filtru v průběhu čištění se provádí rotací filtračních článků pomocí odstředivé síly.

3. Svíčkový filtr je v současnosti nejpoužívanějším typem filtru (obr. 2). Svíčkové filtry pracují obdobným způsobem jako síťové filtry. Hlavním rozdílem je tvar filtračního elementu, kterým je zde porézní materiál ve tvaru dutého válce (svíčky) uzavřeného na jednom konci. V pivovarech se využívá konstrukce perforované trubky 1 až 2 m dlouhé, tomu odpovídají i filtrační plochy, které jsou od 0,13 do 1,30 m² (Moll, 1994), na které je navinutý profilový lichoběžníkový drát nebo nasazený drátový kroužek o průměru drátu cca 0,8 mm a průměru kroužku cca 25 mm. Vzniká mezi nimi šterbina přesně stanovených rozměrů pohybující se kolem 50 µm. Na rozdíl od deskové a síťové

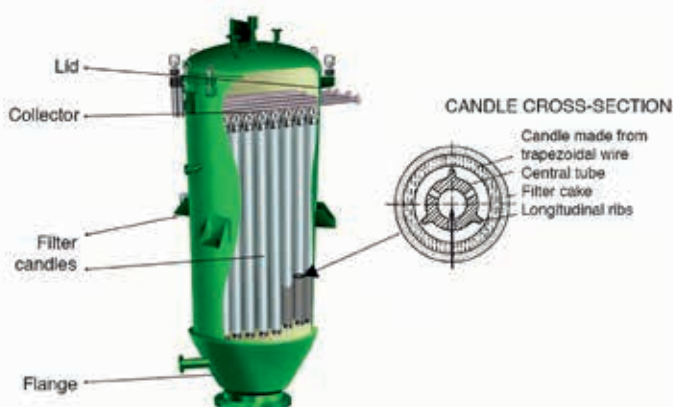


Fig. 2 Scheme of a candle filter and cross-section of candle filter (Mikulec, 2016)



Obr. 2 Schéma svíčkového filtru a řez filtrační svíčkou (Mikulec, 2016)

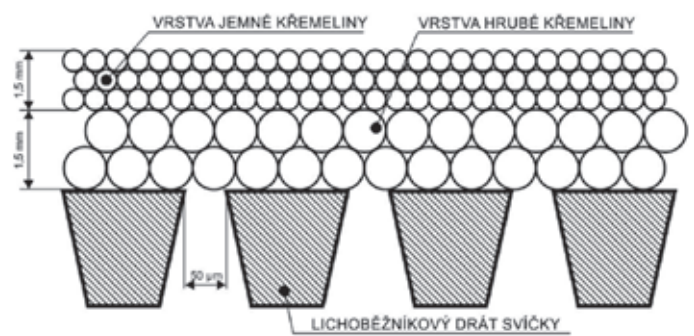
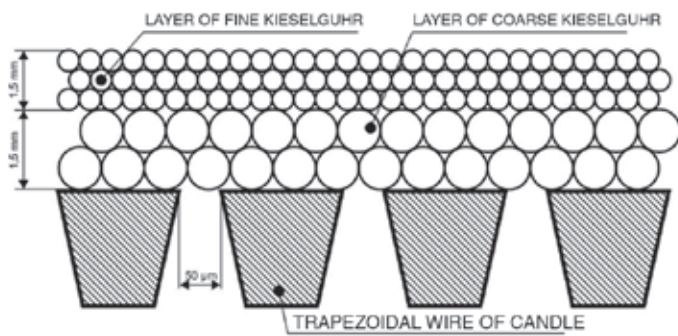


Fig. 3 Diagram of first and second pre-coat on the filter candle (Mikulec, 2016)

Obr. 3 Schéma 1. a 2. náplavu na filtrační svíčke (Mikulec, 2016)

which a profiled trapezoidal wire is wound, or wire rings are placed on it with a wire diameter of approx. 0.8mm and ring diameter approx. 25mm. A gap of precisely defined dimensions of about 50 µm is formed between them. Unlike plate and sieve filtration, where the filtration surface remains constant during the process, the candle thickness and the filtration surface of candle filters increases with progressive coating (Fig. 3). The design of the filters is such that the candles open into a separate space for the filtered beer, or the individual candles are connected to a pipeline system where the filtered beer is collected (Basařová et al., 2010).

4.3.2 Membrane filtration

Filtration using membrane filters is currently state-of-the-art technology for a number of brewery technological steps, the most important being water treatment, sterile filtration or beer dealcoholization using microfiltration, ultrafiltration, reverse osmosis, pervaporation and gas separation (Ambrosi, 2014).

Filtration membrane modules are constructed in many ways and there is also a variety of materials from which they are made. The least-used ceramic filter modules, used primarily in Japan, provide a high level of beer sterility but are very sensitive to pressure shocks (Moll, 1994).

The most widely used are candles with a plastic support on a cylindrical construction, which are made of various materials such as polypropylene, PES, nylon and others. Their most common use is sterile filtration of beer replacing pasteurization. In breweries, we can also encounter so-called „trap“ filters, which are mostly large-area candles. Their function is to pick up the remaining particles after kieselguhr or stabilization filtration.

Depending on the flow mode of filtered beer by the membrane, we distinguish two types of filtration, namely „dead-end“ filter modules

filtrace, kde zůstává filtrační plocha během procesu konstantní, u svíčkových filtrů s postupujícím napláváním roste tloušťka svíček, a tím i filtrační plocha (obr. 3). Konstrukce filtrů je řešena tak, že svíčky ústí do odděleného prostoru pro filtrované pivo nebo jsou jednotlivé svíčky napojeny na soustavu potrubí, kudy je filtrované pivo odváděno (Basařová et al., 2010).

4.3.2 Membránová filtrace

Filtrace pomocí membránových filtrů je v současnosti nejmodernější technologií, která je určena pro řadu technologických kroků v pivovarství, z nichž nejdůležitější jsou úprava vody, sterilní filtrace nebo dealkoholizace piva, za použití mikrofiltrace, ultrafiltrace, reverzní osmózy, pervaporace a separace plynů (Ambrosi et al., 2014).

Filtrační membránové moduly jsou konstruovány mnoha způsoby, stejně tak existuje řada materiálů, z kterých jsou vyráběny. Nejméně používané jsou již výše uvedené keramické filtrační moduly, používané zejména v Japonsku, které zajišťují vysokou úroveň sterility piva, ale jsou velmi citlivé na tlakové rázy (Moll, 1994).

Nejvíce používané jsou svíčky s plastovou přepážkou na válcové konstrukci, které se vyrábějí z různých materiálů, jako polypropylen, PES, nylon a další. Jejich nejčastější použití je na sterilní filtraci piva nahrazující pasteraci. V pivovarech se můžeme také setkat s takzvanými zajišťovacími (trap) filtry, což jsou většinou velkopovrchové svíčky, jejichž funkcí je vylákat zbylé částice po křemelinové nebo stabilizační filtraci.

Podle způsobu průtoku filtrovaného piva membránou rozlišujeme dva typy filtrace, a to „dead-end“ filtrační moduly tvořené převážně svíčkami se skládaným filtrem (obr. 4) a typ „cross flow“ filtry, které jsou konstruovány z dutých vláken (obr. 5, 6). Při filtraci „dead-end“ prochází pivo membránou a částice větší, než je velikost póru mem-

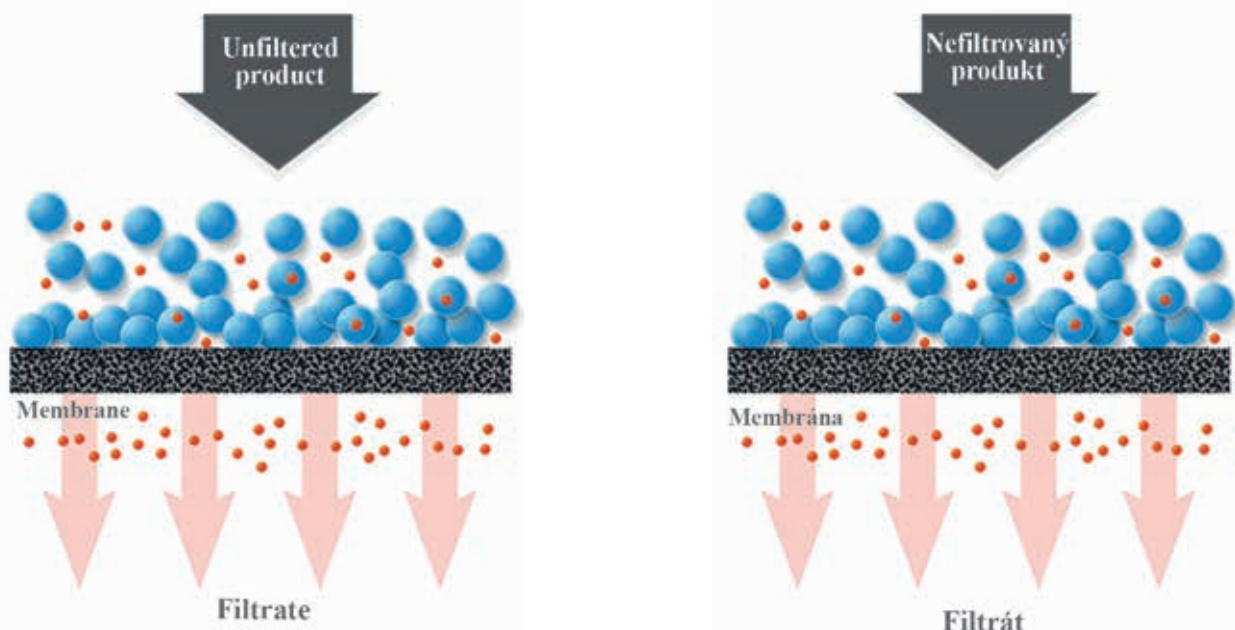


Fig. 4 Scheme of the „dead-end“ filtering principle (Bílek, 2016, published courtesy Bílek Filtry, s.r.o.)

Obr. 4 Znázornění principu „dead-end“ filtrace (Bílek, 2016, publikováno se svolením fy Bílek Filtry, s.r.o.)

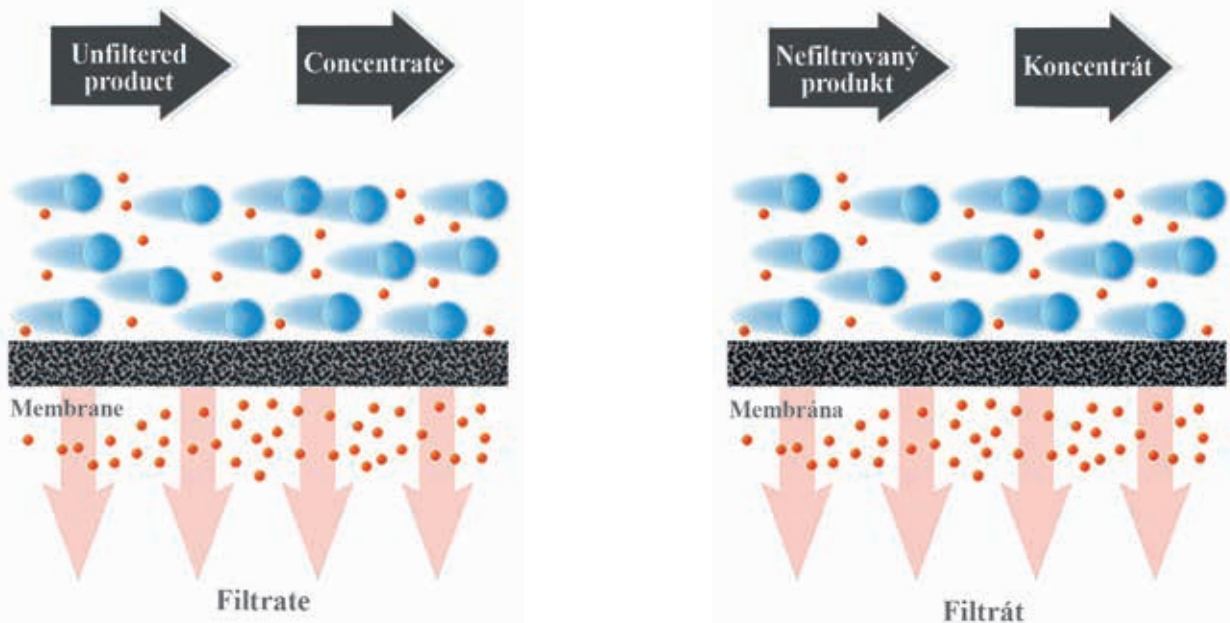


Fig. 5 Functional scheme of the principle of „cross-flow“ filtration (Bílek, 2016, published courtesy Bílek Filtry, s.r.o.)

consisting mainly of candles with a pleated filter (Fig. 4) and “cross-flow” filters constructed from hollow fibers (Fig. 5 and 6). In a „dead-end“ filtration the beer passes through the membrane, and particles larger than the size of the membrane pore are trapped on its surface to form a filter cake on the surface of the membrane. This gradually reduces the filtering efficiency, which can be increased again after membrane regeneration. Cross-flow filtration works in two modes, batch and continuous. In the batch mode, the entire batch is circulated through the membrane, the filtrate is collected and the input substrate is concentrated in the storage tank. In a continuous arrangement, the same amount of solution is maintained in the circulation tank by replenishing the unfiltered product.

4.3.3 Plate filters for post-filtration

As mentioned above, due to the low flow rate plate filters are inappropriate for the main filtration and are being abandoned for this purpose. However, they are used for the post-filtration of beer using the so-called EK plates (from the German word Entkeimung) or prefiltration. The standard dimensions of the plates are 60 x 60 to 100 x 100 cm, with a filtering power of 120 hL/h corresponding to about 240 plates (Briggs et al., 2004).

5 FILTRATION CHECKS

During filtration and after it has been completed, it is necessary to check the efficiency and quality of this process. Therefore, both operation and laboratory testing of the filtered beer are carried out. The most important operating controls include the monitoring of filtered volumes, filtration times, pressure differences (transmembrane pressure), consumption of filter media, and checking the turbidity of fil-

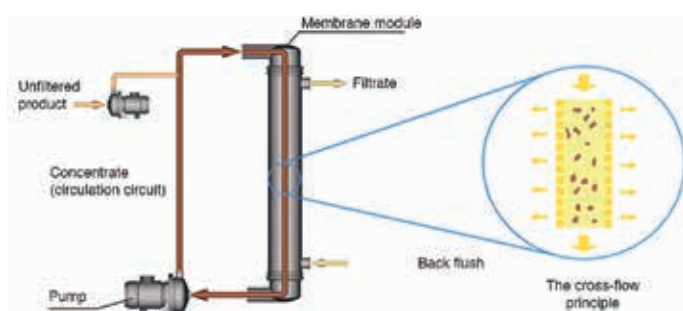
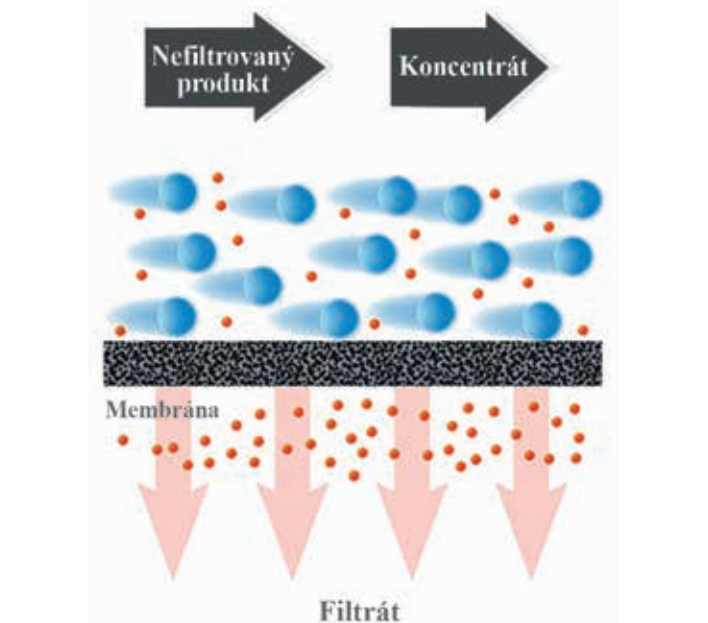


Fig. 6 Flow diagram of the „cross-flow“ filter (Bílek, 2016, published courtesy Bílek Filtry, s.r.o.)



Obr. 5 Znárodnění principu „cross flow“ filtrace (Bílek, 2016, publikováno se svolením fy Bílek Filtry, s.r.o.)

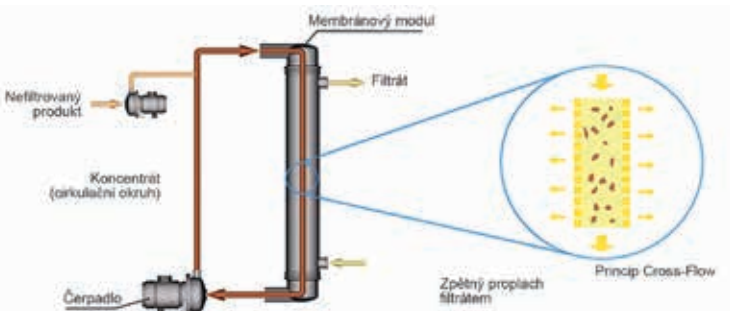
brány, jsou zachyceny na jejím povrchu, čímž tvoří filtrační koláč na povrchu membrány. Tím se postupně snižuje filtrační výkon, který lze opět zvýšit regenerací membrány. „Cross flow“ filtrace pracuje ve dvou režimech, vsádkovém a kontinuálním. Ve vsádkovém je celá vsádka cirkulována přes membránu a je odebírán filtrát a v zásobním tanku se zahuštuje vstupní substrát. V kontinuálním uspořádání je udržováno stále stejné množství roztoku v cirkulačním tanku doplňováním nezahuštného produktu.

4.3.3 Deskové filtry pro dofiltraci

Jak již bylo uvedeno výše, deskové filtry jsou vzhledem k malé průtočnosti pro hlavní filtraci nevhodné a od jejich použití se v tomto směru opouští. Používají se však pro dofiltraci piva s použitím tzv. EK desek (z německého slova Entkeimung znamenajícího odzárkování) nebo pro předfiltraci. Běžné rozměry desek jsou 60 x 60 až 100 x 100 cm, filtračnímu výkonu 120 hl/h odpovídá asi 240 desek (Briggs et al., 2004).

5 KONTROLA FILTRACE

Během filtrace a po jejím skončení je nutné provádět kontrolu účinnosti a správnosti tohoto procesu. Proto se provádí jak provozní, tak i laboratorní kontrola filtrovaného piva. K nejdůležitějším provozním kontrolám patří sledování filtrovaných objemů, doby filtrace, tlakové difference (před a za membránou), spotřeby filtračních prostředků, kontrola zákalů zfiltrovaného a také nefiltrovaného piva. V laboratořích se provádí zkouška zákalu (srovnávací zkouška zajišťující kontrolu provozních čidel), dále se stanovuje obsah kyslíku a hodnota pH. Zjišťuje se také vliv filtrace na změnu barvy piva, extraktu a provádí se také mikrobiologická kontrola.



Obr. 6 Funkční schéma „cross flow“ filtrace (Bílek, 2016, publikováno se svolením fy Bílek Filtry, s.r.o.)

tered and unfiltered beer. In the laboratories, a turbidity test is performed (comparative test to control in-line sensors), oxygen content and pH are determined. The influence of filtration on the color and the extract of beer is investigated and the microbiological control is also performed.

6 SUMMARY OF MODERN STUDIES

The fact that filtration is still a very topical subject is supported by a large number of modern technical studies. In them, the authors try to explain the causes of lower efficiency of filtration and propose new, better technologies.

6.1 Fouling mechanisms

In order to create an ideal filtering technology, it is necessary to know not only the causes but also the mechanisms of filter fouling. This issue is addressed by a number of researches. Kuiper et al. monitored the blocking of the membrane during beer filtration using a microscope. They found that the main cause was microparticles, probably precipitated proteins that formed clumps on the surface of the membrane, thus limiting the flow. These clusters can be eliminated by short-term strong flow increases in the cross-flow system. However, under these clusters a blocking layer is formed which cannot be removed in this way (Kuiper et al., 2002).

Benítez et al. tried to formulate a model to predict the concentration of colloidal particles in Pilsen-type beer before filtration. Using SEM (scanning electron microscopy) and image analysis, the distribution of colloidal particles in beer was derived. Colloidal particles are mainly composed of polysaccharides (96.89%), proteins (2%), polyphenols (less than 0.3%) and very low yeast concentrations (<0.25%). Due to the different particle types in the sample, the particle size distribution was divided into 4 main zones in the multimodal histogram, which were identified as follows: (1) very small individual particles (0.06 µm), (2) yeast (3 µm), (3) colloidal aggregates (17 µm), and (4) particles with a large size distribution (two maxima of 101 and 200 µm). The particle size and their amount correlated well with digital image analysis and haze. The aggregate dimension ($D_f > 2.4$) found is typical for agglomerates formed by rapid flocculation or by diffusion-limited aggregated (Benítez, et al. 2013).

The extensive review by Iritani and Katagiri summarized the laws of filtration blocking mechanisms and focused particularly on micro-filtration and ultrafiltration membrane modules. These laws include both pore blocking of filter materials and the formation of „sludge“ cakes. The authors furthermore address the behavior of Newtonian and non-Newtonian liquids under constant pressure and filtering speeds. The laws governing blocking mechanisms in filtering can easily be used to identify the predominant fouling mechanism from experimental flow drop data at constant filtration pressure or pressure increase at constant filtration flow (Iritani and Katagiri, 2016).

The review by Sman et al. summarized hypotheses about the membrane fouling mechanism during beer filtration through membrane cross-flow filters. This work characterized 3 types of substances causing beer turbidity: yeast (5 µm), colloids (i.e. colloidal particles, 0.5 – 2.0 µm) and macromolecules (ie proteins and carbohydrates, ≤ 0.4 µm). Each of these substances has a different membrane fouling mechanism and, of course, the mechanism and rate of fouling strongly depends on its properties. The following hypotheses based on these data have been proposed:

1. Blocking of membranes during filtration is caused by yeast cells, protein-polyphenolic aggregates and macromolecules (proteins, polysaccharides and polyphenols).

2. Yeast cells have a larger size than the nominal pore size on the surface of the membrane and are therefore retained on the membrane and form a layer on the membrane which is relatively easy to remove by the backflush.

3. The angle of rotation of the macromolecules is smaller than the pore size in the selective layer and therefore the macromolecules can penetrate into the membrane. When they pass through the membrane, they can potentially adsorb onto the surface to form a gel, which can lead to a reduction in the size of the pores, but not to completely close them. This is due to the nature of the porous gel layer. This type of fouling is irreversible and can only be removed by chemical cleaning.

4. The protein-polyphenolic aggregates cannot pass through the selective layer and remain on its surface. The aggregates may also be entrapped inside the yeast cake or gel layer of adsorbed macromolecules. They are believed to form complexes with adsorbed mac-

6 SOUHRN NOVODOBÝCH STUDIÍ

O tom, že je filtrace stále velmi aktuální téma, svědčí velká řada novodobých odborných studií. V nich se autoři snaží vysvětlit příčiny nižší efektivity filtrace a navrhuji nové, lepší technologie.

6.1 Mechanismy zanášení filtrů

K vytvoření ideální filtrační technologie je nutno znát nejen příčiny, ale také mechanismus zanášení filtračních materiálů. Této problematice se věnuje řada výzkumů. Kuiper a kol. sledovali ucpávání membrány během filtrace piva pomocí mikroskopu. Zjistili, že hlavní příčinou jsou mikročástice, pravděpodobně vysrážené proteiny, které tvořily shluky na povrchu membrány, a tak omezovaly průtok. Tyto shluky lze odstranit krátkodobým silným navýšením průtoku v systému cross-flow. Nicméně pod těmito shluky dochází ke tvorbě vrstvy ucpávající póry, kterou již tímto způsobem nelze odstranit (Kuiper et al., 2002).

Benítez a kol. se pokusili formulovat model pro predikci koncentrace koloidních částic v pivu pilsenského typu před filtrací. Pomocí metody SEM (scanning electron microscopy) a analýzy obrazu odvodili distribuci koloidních částic v pivu; koloidní částice jsou tvořeny převážně z polysaccharidů (96,89 %), bílkovin (2 %), polyfenolů (méně než 0,3%) a velmi nízké koncentrace kvasinek (<0,25%). Vzhledem k různým typům částic ve vzorku došlo v multimodálním histogramu k rozdělení podle velikosti částic do 4 hlavních zón, které byly identifikovány následovně: (1) velmi malé individuální částice (0,06 µm), (2) kvasinky (3 µm), (3) koloidní agregáty (17 µm), a (4) částice s vysokým rozptylem velikosti (dvě maxima 101 a 200 µm). Velikost částic a jejich množství dobře korelovaly s digitální analýzou obrazu a zákalem. Zjištěný rozměr agregátů ($D_f > 2,4$) je typický pro agregáty tvořené rychlou flokulací nebo difúzí limitovanou agregací (Benítez, 2013).

Obsáhlé review autorů Iritani a Katagiri shrnuje zákony blokačních mechanismů filtrace a zaměřuje se zejména na mikrofiltrační a ultrafiltrační membránové moduly. Tyto zákony zahrnují jak zanášení pórů filtračních materiálů, tak tvorbu „kalových“ koláčů. Autoři se dále ve své práci věnují chování newtonských a ne-newtonských kapalin za podmínek stálého tlaku a filtrační rychlosti. Zákony blokačních mechanismů při filtraci lze snadno použít pro identifikaci převládajícího mechanismu zanášení z experimentálních dat poklesu průtoku za konstantního tlaku filtrace nebo nárůstu tlaku za konstantního průtoku filtrace (Iritani a Katagiri, 2016).

Přehledový článek autorů Van der Sman et al. (2012) shrnuje hypotézy o mechanismu zanášení membrán během filtrace piva přes membránové cross flow filtry. Tato práce charakterizuje 3 typy látek podílející se na zákalu piva, a to kvasinky (5 µm), koloidy (tj. koloidní částice, 0,5 – 2,0 µm) a makromolekuly (tj. proteiny, sacharidy, ≤ 0,4 µm). Každá z těchto látek má jiný mechanismus zanášení membrány a samozřejmě mechanismus a rychlost zanášení silně závisí na jejich vlastnostech. Z těchto faktů vychází hypotézy autorů:

1. Zanášení membrán při filtraci piva způsobují kvasničné buňky, bílkovinné-polyfenolické agregáty a makromolekuly (proteiny, polysacharidy a polyfenoly).

2. Kvasničné buňky mají větší velikost, než je nominální velikost pórů na povrchu membrány, a proto jsou na membráně zadržovány a tvoří na ní vrstvu, která je však pomocí zpětného toku poměrně jednoduše odstranitelná.

3. Úhel rotace makromolekul je menší než velikost pórů v selektivní vrstvě, a proto mohou makromolekuly pronikat do membrány. Při průchodu membránou se potenciálně mohou adsorbovat na její povrch a vytvořit tak gel, což může vést k omezení velikosti pórů, nikoli však k jeho úplnému uzavření. To plyne z podstaty porézní gelové vrstvy. Tento typ zanesení je ireverzibilní a lze ho odstranit pouze pomocí chemického čištění.

4. Bílkovinné-polyfenolické agregáty selektivní vrstvou projít nemohou a zůstanou na jejím povrchu. Agregáty mohou být také zachyceny uvnitř kvasničného koláče nebo ve vrstvě gelu adsorbovaných makromolekul. Předpokládá se, že agregáty mohou vytvářet komplex s absorbovanými makromolekulami, jako jsou proteiny nebo polysacharidy. Zanesení agregátů je obecně považováno za reverzibilní proces. Pouze v případě, kdy je agregát zachycen na gelovou vrstvu makromolekul, je zanesení ireverzibilní.

Autoři testovali tyto hypotézy porovnáním predikčního modelu s experimentálními údaji dead-end filtrace modelového piva. Toto srovnání potvrdilo, že hypotézy jsou platné (Van der Sman et al., 2012).

romolecules such as proteins or polysaccharides. Fouling by aggregates is generally considered to be a reversible process. The clogging is irreversible only when the aggregate is captured on the gel layer of macromolecules.

The authors tested these hypotheses by comparing the prediction model with the experimental data of dead-end filtration of a model beer. This comparison confirmed that the hypotheses are valid (Van der Sman et al., 2012).

Sensidoni et al. have dealt with the distribution of particles in filtered beer and the stability of beer against chill haze in the temperature range of 6–20 °C. With the addition of different enzyme cleaving proteins, they observed a deterioration in the colloidal stability of beer. The particle size distribution study showed that the primary cause of blocking and diminution of the membrane pore size was at the beginning of the filtration, while the influence of the growing cake on the surface of the membrane prevailed over time (Sensidoni et al., 2011).

6.2 Effect of beta-glucans on filter fouling

Stewart et al. studied in 1998 the effect of beta-glucans on filterability of a set of 24 beers from commercially available malt. They simulated the membrane filtration using laboratory microfiltration, obtained well-repeatable filterability values for the same varieties and differentiated the varieties based on different filterability. They therefore correlated the contents of the individual components with the filtering parameters. Their results show that the total content of beta-glucans has a lower effect on filterability than their molecular weight profile. For the prediction of filterability, therefore, it is more appropriate to represent the individual beta-glucans rather than their total sum. (Stewart et al., 1998).

A similar conclusion can be drawn from another study. The authors, Jin et al., studied the effect of beta-glucans, shear forces, pH and ethanol on the beer filterability, which they evaluated in a test using a 0.45 µm laboratory membrane filter at constant pressure. The experiment showed that the presence of beta-glucans causes the lower beer filterability. The maximum amount of beer filtered through the membrane filter (V_{max}) and the initial filtration rate (Q_{init}) were reduced by adding higher concentrations of higher molecular weight beta-glucans, corresponding to the results of Stewart et al, according to which the molecular weight of beta-glucans has a greater influence on the filterability than their total content.

The following results show the effect of other studied parameters on filterability. Beer exposed to shear forces at 0–10 °C showed lower V_{max} and Q_{init} values, higher pH values (from 3.8 to 4.6) improved beer filterability. Finally, beers containing 5 to 10% (v/v) of ethanol had lower Q_{init} and higher V_{max} values compared to non-alcoholic samples (Jin et al., 2004).

Kupetz et al. in their new study also attributed the deterioration of the filterability to beta-glucans. They stated, among other things, that the existing methods of determination of beta-glucans are not completely consistent, so the method of their measurement must always be stated in the results. In addition to beta-glucans, they have also reported a significant effect of the molecular weight and nature of polymers influencing beer viscosity, and the relationship between the content of beta-glucans and fatty acids, or their esters. Comparative study of beer filterability was performed on kieselguhr and membrane filters. The authors found that beta-glucans alone affect the membrane filtration, which may thus be reduced by up to 40% relative to the kieselguhr filtration. Furthermore, the combined synergistic effect of beta-glucans and fatty acid esters on the filterability was observed. Since 90% decrease of fatty acid esters have been observed in filtered beer, it is likely that these substances will be trapped on the membrane and affect its permeability. This hypothesis was confirmed in a subsequent experiment where the authors monitored the efficiency of cross-flow filtration by artificially adding fatty acids and their methyl esters to control beer. In this beer, TMP (transmembrane pressure) on the Pentair X-flow membrane significantly increased during filtration. The highest increase was observed for methyl esters of fatty acids, a moderate but still marked increase was confirmed by the addition of fatty acids themselves (Kupetz et al., 2015a; 2015b; 2017).

6.3 Methods to improve filtration

One of the ways to increase the efficiency of filtration is the application of highly selective enzymes for the degradation of high molecular weight arabinoxylans (pentosans) and beta-glucans. Larsen et al. published a study that describes the application of selected enzymes in the filterability enhancement that does not adversely af-

Sensidoni a kol. se zabývali distribucí částic ve filtrovaném pivu a stabilitou piva vůči chladovému zákalu v rozsahu teplot 6–20 °C. Při přidavku různých enzymů štěpících bílkoviny pozorovali zhoršení koloidní stability piva. Pomocí studie distribuce zachycených částic vyplynulo, že na počátku filtrace je hlavní příčinou ucpávání a zmenšování velikosti pórů membrány, zatímco s přibývajícím časem převažuje vliv zvětšujícího se koláče na povrchu membrány (Sensidoni et al., 2011).

6.2 Vliv beta-glukanů na zanášení filtrů

Stewart a kol. studoval v roce 1998 vliv beta-glukanů na filtrovatelnost na souboru 24 piv z komerčně dostupných sladů. Autoři simulovali membránovou filtraci pomocí laboratorní mikrofiltrace. Získali dobře opakovatelné hodnoty filtrovatelnosti pro stejné odrůdy a rozlišili jednotlivé odrůdy na základě rozdílné filtrovatelnosti. Proto korelovali obsah jednotlivých složek s parametry filtrace. Z jejich výsledků vyplývá, že celkový obsah beta-glukanů má menší vliv na filtrovatelnost než jejich profil podle molekulové hmotnosti. Pro predikci filtrovatelnosti je tedy vhodnější metoda zastoupení jednotlivých beta-glukanů než jejich celková suma. (Stewart et al., 1998).

Podobný závěr lze vyvodit i z další studie z roku 2004. Autoři Jin a kolektiv studovali vliv beta-glukanů, střížných sil, pH a obsahu ethanolu na filtrovatelnost piva, kterou vyhodnotili pomocí laboratorního filtračního testu s membránami 0,45 µm za konstantního tlaku. Z experimentu vyplývá, že přítomnost beta-glukanů způsobuje nižší filtrovatelnost piva. Maximální množství piva filtrovaného přes membránový filtr (V_{max}) a počáteční rychlost filtrace (Q_{init}) se snížily přidáním vyšších koncentrací beta-glukanů o vyšší molekulové hmotnosti, což odpovídá výsledkům Stewart a kol., podle nichž má větší vliv na filtrovatelnost molekulová hmotnost beta-glukanů než jejich celkový obsah. Další uvedené výsledky svědčí o vlivu ostatních studovaných parametrů na filtrovatelnost. Pivo vystavené střížným silám při 0–10 °C vykazovalo nižší hodnoty V_{max} a Q_{init} , vyšší hodnoty pH (z rozmezí 3,8 až 4,6) zlepšily filtrovatelnost piva. Konečně piva obsahující 5 až 10% (obj.) ethanolu měla nižší Q_{init} a vyšší hodnoty V_{max} ve srovnání s nealkoholickými vzorky (Jin et al., 2004).

Také Kupetz a kolektiv přisuzuje ve své nové studii zhoršení filtrovatelnosti obsahu beta-glukanů. Ve své práci mimo jiné uvádí, že existující metodiky stanovení beta-glukanů nejsou zcela konzistentní, proto je nutné způsob jejich měření vždy u výsledků uvádět. Kromě beta-glukanů popsali významný vliv molární hmotnosti a povahy polymerů ovlivňujících viskozitu piva a vztah mezi obsahem beta-glukanů a mastných kyselin, popřípadě jejich esterů. Srovnávací studie filtrovatelnosti piva byla provedena na křemelinových a membránových filtrech. Autoři zjistili, že samotné beta-glukany ovlivňují zejména filtraci membránovou, kde zaznamenali zhoršení filtrace až o 40% oproti filtraci křemelinové. Dále byl pozorován kombinovaný synergický vliv beta-glukanů a esterů mastných kyselin na filtrovatelnost. Vzhledem k tomu, že ve filtrovaném pivu byl zaznamenán 90% pokles esterů mastných kyselin, lze předpokládat s vysokou pravděpodobností, že se tyto látky zachycují na membráně a ovlivňují její propustnost. Tato hypotéza byla potvrzena v následném experimentu, kdy autoři sledovali účinnost cross flow filtrace při umělém přidavku mastných kyselin a jejich methyl esterů do kontrolního piva. V tomto pivu se výrazně zvýšil TMP (transmembrane pressure – mezimembránový tlak) na membráně Pentair X – flow v průběhu filtrace. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u methyl esterů mastných kyselin, mírnější, ale stále markantní nárůst byl potvrzen při přidavku samotných mastných kyselin (Kupetz et al. 2015a; 2015b; 2017).

6.3 Způsoby zlepšení filtrace

Jednou z možností, jak zefektivnit filtraci, je aplikace vysoce selektivních enzymů pro degradaci vysokomolekulárních arabinoxylanů (pentosanů) a beta-glukanů. Autoři Larsen a kol. uveřejnili studii, ve které popisují funkci vybraných enzymů pro zlepšení filtrovatelnosti takovým způsobem, aby tento proces neměl negativní dopad na kvalitu procesu a neovlivňoval organoleptický charakter finálního piva. Autoři testovali velké spektrum enzymů xylanas s ohledem na vysokou efektivitu tohoto procesu. Porovnávali parametry sezození ječného sladu a nesladovaného ječmene, ze získaných dat odvodili složení hlavních složek rmutu tak, aby využili v maximální možné míře funkčnost enzymu a dosáhli tak optimální účinnosti separace. Vybrané preparáty byly testovány v pilotních pivovarských studiích. Kritické parametry včetně stability filtračního koláče při sezození a tlakovém nárůstu při filtraci piva byly testovány za použití různého

fect the quality of the process and does not affect the organoleptic character of final beer. The authors tested a wide range of xylanase enzymes with regard to the high efficiency of this process. They compared the lautering parameters of barley malt and unmalted barley and used the data to derive the composition of the main mash components that would make the most of the enzyme's activity to achieve the optimal separation efficiency. Selected preparations were tested in pilot brewing studies. Critical parameters, including the stability of the filter cake during lautering and the pressure increase of beer filtration, have been tested using a variety of raw materials composition. From these experiments they derived the impact of the substrate selectivity of the various xylanases on different arabinoxylan fractions. The study confirmed that the application of xylanases, which are highly selective to water-extractable arabinoxylans, for brewing purposes has the following advantages:

1. separation of mash and beer filtration takes place more easily;
2. minimizing the risk of cake collapsing;
3. reduce the risk of foreign flavors and odors caused by the degradation of arabinoxylan (xylanase may lead to free ferulic acid and 4-vinylguaiacol under uncontrolled conditions);
4. tolerance to xylanase overdose.

Xylanases can also be successfully applied with very beneficial effects in combination with beta-glucanases (Larsen et al., 2015).

6.4 New filter materials

Currently, kieselguhr is the dominant filtering agent in the food and beverage industry thanks to its high porosity and good filtration resistance. However the use of kieselguhr is also critically considered as a result of stricter environmental regulations. Kieselguhr cannot be recycled and its sources are limited. Its use is associated with health risks, e.g. its inhalation causes lung disease. It can also be a source of trace heavy metals, such as arsenic. Therefore research on alternative filtration materials is very important and necessary.

An example of the newly tested filter oil is the natural rock alginite, an immature oil shale from Gércé in Hungary. Before using alginite for filtration, the raw material must be heat activated and washed with water. The resulting material, A 1000, is free of organic matter, releases minimal amounts of ions to the leachate and has no swelling. However, in laboratory experiments, it was found that A 1000 causes a short service life of the filter. Beta-glucans are retained to a higher degree in the filter cake, which results in higher cake resistance. This has been reduced by the addition of commercial filtering agents such as kieselguhr and perlite. Another disadvantage of alginite, when used in high amounts, is the decrease in the concentration of bitter substances during filtration. (Hippmann et al., 2016).

Pre-coat filtration of beer can be improved by using alternative filtration means, so-called viscose fibers. Their main advantage is the adjustable throughput in the filter cake and their adjustable porosity in accordance with the generally controlled filter system process variables. The results of the study show that an optimal way of filtering for a given type of beer can be found by selecting the shape and length of the fibers, their throughput and compressibility. Functional viscose fibers are a promising alternative to kieselguhr filters in beer and other food filtration. It is to be expected that if these fibers are efficiently treated to suit pre-coat filtration, breweries will be able to use their existing candle filter lines without having to make investment-intensive changes in their technology (Zacharis et al., 2017).

Another possible alternative may be cellulose, which can be regenerated several times, is easily disposed of and is commonly available as a renewable raw material. The use of cellulose also does not bring any known health risks. However, filtration with the cellulose itself was not sufficiently effective, but after addition of the silica sol to the cellulose dosing mixture, the turbidity of the filtrate was significantly reduced, the filtration efficiency being dependent on the method of adding the sol to the filtration mixture. The authors also mention rice ash as an alternative filter material due to its similarity to kieselguhr (Braun et al., 2011).

6.5 Centrifuges

Disk separators are used in breweries to clean beer before final filtration for about a hundred years. A more modern type of these centrifuges, automatically discharged devices, have been used for more than 60 years. The use of these machines originally negatively influenced the qualitative parameters of beer because of contact with oxygen, inconsistent discharge, heating of the product and, last but not least, a great problem with the difficult cleaning of these devices. Modern today's separators are designed to efficiently clean the beer without aeration, to allow effective device cleaning without disassem-

sembly of raw materials. Z těchto experimentů byl odvozen dopad substrátové selektivity různých xylanů na rozdílné frakce arabinoxylanů. Studie potvrzuje, že aplikace xylanů pro pivovarské účely, které jsou vysoce selektivní k vodou extrahovatelným arabinoxylanům, má následující výhody:

1. separace rmutu a filtrace piva probíhá snadněji;
2. je minimalizováno riziko kolapsu koláče při scezování;
3. snižuje se riziko tvorby cizích chutí a vůní způsobené degradací arabinoxylanu (xylanasa může za neřízených podmínek způsobit vznik volné ferulové kyseliny a 4-vinylguajakolu);
4. tolerance vůči předávkování xylanou.

Xylanasy mohou být také úspěšně aplikovány s velmi příznivým účinkem v kombinaci s beta-glukanasami (Larsen et al., 2015).

6.4 Nové filtrační materiály

V současné době je křemelina dominantním filtračním prostředkem v potravinářském a nápojovém průmyslu, a to díky vysoké porozitě a dobré filtrační odolnosti. Použití křemeliny je však kriticky přehodnocováno v důsledku přísnějších předpisů v oblasti životního prostředí. Křemelina nelze recyklovat a její zdroje jsou omezené. Její používání je spojeno se zdravotními riziky, např. její vdechování způsobuje plicní choroby, může být také zdrojem stopových těžkých kovů, jako je například arsen. Proto je výzkum alternativních materiálů pro filtraci velmi důležitý a potřebný.

Příkladem nově testovaného filtračního materiálu je přírodní skalní alginit, což je nezralá ropná břidlice z Gércé v Maďarsku. Před použitím alginitu pro filtraci musí být surový materiál tepelně aktivován a promyt vodou. Získaný materiál A 1000 je prostý organických látek, do vyluhu uvolňuje minimální množství iontů a nemá žádnou bobtnavost. Při laboratorních pokusech však bylo zjištěno, že A 1000 způsobuje krátkou provozní životnost filtru. Ve filtračním koláči se vyšší měrou zadržují beta-glukany, což způsobuje vyšší odpor koláče. Ten se autorům podařilo snížit přidáním komerčních filtračních prostředků, jako jsou křemelina a perlit. Další nevýhodou alginitu (použitého ve vysokém množství) je pokles koncentrace hořkých látek během filtrace. (Hippmann et al., 2016).

Nadějí pro naplavovací filtraci piva mohou být alternativní filtrační prostředky, tzv. viskózní vlákna. Jejich hlavní předností je nastavitelná propustnost ve filtračním koláči a jejich nastavitelná poréznost v souladu s obecně řízenými proměnnými procesy filtračního systému. Z výsledků studie vyplývá, že pomocí vhodného výběru tvaru a délky vláken, jejich propustnosti a stlačitelnosti lze najít optimální způsob filtrace pro daný typ piva. Funkční viskózní vlákna jsou slibnou alternativou ke křemelinovým filtrům ve filtraci piva a dalších potravin. Lze očekávat, že pokud dojde k efektivní úpravě těchto vláken tak, aby vyhovovala naplavovací filtraci, budou moci pivovary využít své stávající svíčkové filtrační linky, aniž by musely provádět investičně náročné změny ve své technologii (Zacharis et al., 2017).

Další z možných alternativ může být celulóza, kterou lze několikrát násobně regenerovat, snadno se likviduje a je běžně dostupnou obnovitelnou surovinou. Použití celulózy také nepřináší žádná známá zdravotní rizika. Jak vyplývá ze studie autorů Braun et al, účinnost filtrace pomocí celulózy nebyla dostatečná, ale po přidání křemičitého solu do dávkovací směsi celulózy se významně snížil zákal filtrátu, přičemž účinnost filtrace byla závislá na způsobu přidávku solu do filtrační směsi. Autoři jako alternativní filtrační materiál uvádí i rýžový popel vzhledem k jeho podobnosti s křemelinou (Braun et al., 2011).

6.5 Odstředivky

Diskové separátory jsou používány v pivovarech k čištění piva před finální filtrací již asi sto let. Modernější typ těchto odstředivek, automaticky vypouštěná zařízení, se používají více než 60 let. Použití těchto strojů původně negativně ovlivnilo kvalitativní parametry piva, neboť docházelo ke kontaktu s kyslíkem, nekonzistentnímu vypouštění, ohřevu výrobku a v neposlední řadě byla velkým problémem náročná sanitace těchto zařízení. Moderní odlučovače jsou již navrženy tak, aby efektivně vyčistily pivo bez provzdušnění, aby byly efektivně vyčištěny bez demontáže, aby separovaly kvasnice s maximálním výtěžkem čirého piva a aby byly spolehlivé při nízkých nárocích na údržbu. Separáčnická účinnost moderních odlučovačů může být až 99,9%, takže vyčištěné pivo obsahuje méně než 1000 buněk/ml. To platí v případě filtrace bez křemeliny. Pokud následuje běžná křemelinová filtrace, je nutné tuto účinnost snížit, ideálně na 100 000 až 300 000 buněk/ml (Gertsman, 2017).

6.6 Udržitelnost a ekologie

Udržitelnost je v současné době termín běžně používaný nejen v hlavních cílech velkých pivovarských skupin, ale v podstatě

bly to separate the yeast with maximum yield of clear beer and to be reliable at low maintenance requirements. The separation efficiency of modern separators can be as high as 99.9%, so that the beer contains less than 1000 cells/mL. This is recommended for kieselguhr free (membrane) filtration. When followed by conventional kieselguhr filtration, this efficiency has to be reduced, ideally at 100,000 to 300,000 cells/mL (Gertsman, 2017).

6.6 Sustainability and ecology

Sustainability is currently a term commonly used not only among the main goals of large brewing groups, but in virtually all industries. Not only transnational brewing companies, but also large craft breweries in the United States spend considerable resources on technologies to reduce water and energy consumption in their operations. Although filtration has little impact on the environment (the carbon footprint), it is an integral part of beer production and therefore cannot be ignored. (Zuber, 2014). Despite the bad reputation, according to this study, the impact of traditional pre-coat filtration on the environment is much lower than that of membrane systems.

The opposite opinion was published in the same year by Mol, who compared both filter technologies in terms of the carbon footprint, i.e. water consumption, chemical consumption, solid waste and health risks. The kieselguhr production is an energy-intensive process, requiring furnace treatment at a temperature of about 1000 °C. Therefore, the carbon footprint of the kieselguhr is relatively high. Furthermore, kieselguhr is intended for one-way use, which leads to the formation of large quantities of solid waste (about 50% of the total solid waste of the brewery). Finally, the risk of inhalation of kieselguhr causing pulmonary disease must be taken into account. The use of membranes requires higher consumption of chemicals, but their reuse may reduce their consumption by as much as a third. The water consumption for kieselguhr and membrane filtration is comparable, typically 0.05 to 0.10 hL/hL of beer. Regenerable membranes with a typical life of 400 filter cycles have a significantly lower carbon footprint compared to kieselguhr filtration. (Mol, 2014).

6.7 Membrane filtration of non-alcoholic beer

Due to its composition, non-alcoholic beer has different properties (density, viscosity, suspended and soluble particles) than alcoholic beer, which significantly influences its filtration. These differences need to be taken into account when selecting a suitable filtering technology. Study by Yazdanshenas et al. deals with characterization of properties of non-alcoholic beer and their influence on the process of membrane filtration, with a focus on fouling mechanisms and their description. The relationship between the number of particles in the solution and the sample haze was confirmed when filtering non-alcoholic beer on ceramic cross-flow membranes with 0.45 µm pores. Two basic mechanisms to reduce the flow of filtered beer, namely the fouling of the pores during the first 15 minutes of filtration, and the formation of the filter cake from 20 minutes, have been described. The filter cake, including the gel layer, contributes 95% of the total resistance and has the greatest impact on the flow drop. Irreversible membrane blockage (especially pore blocking) contributes to a total resistance by a mere 4%. (Yazdanshenas et al., 2010a).

Different types of membranes of different pore sizes were tested for microfiltration of non-alcoholic beer. It was experimentally confirmed that no significant differences were found between cellulose acetate (CA), cellulose (CN) and nylon (NY) membranes, and flow rates during filtration with these membranes decreased very rapidly. The polytetrafluoroethylene membrane (PTFE) was not permeable at 1 bar, and at 2 bar the flow first increased, decreasing only after a certain period of time. The highest concentration of dissolved particles and haze-forming proteins was observed in the CN membrane, while the NY membrane had the highest decrease in polyphenols and color. The low selectivity of the PTFE membrane can be due to its hydrophobicity and thus weaker interactions with haze-forming proteins (Yazdanshenas et al., 2010b).

7 CONCLUSIONS

Filtration is an indispensable part of production of beer with extended shelf life. Just like the brewing processes, which are adjusting to meeting new requirements, beer filtration technology is also amenable to new trends. The basic problem is no longer to merely produce haze-less beer; the focus is on the speed of filtration and, to a great extent, on the impact on the environment. Although most studies point to a lower "carbon footprint" of membrane filtration over

ve všech průmyslových odvětvích. Nejen nadnárodní pivovarské společnosti ale také velké řemeslné pivovary ve Spojených státech vynakládají nemalé prostředky na technologie pro snižování spotřeby vody a energie ve svých pivovarech. I když filtrace má pouze malý dopad na životní prostředí (uhlíková stopa), je nedílnou součástí výroby piva, a proto ji nelze opominout. (Zuber, 2014). Podle tohoto článku má navzdory špatné pověsti tradiční naplavovací filtrace podstatně menší dopad na životní prostředí než membránové systémy.

Opačný názor publikoval ve stejném roce Mol, který obě filtrační technologie srovnává podle uhlíkové stopy, tj. spotřeba vody, chemická spotřeba, pevný odpad a zdravotní rizika. Proces výroby křemelin je energeticky náročný, vyžaduje úpravu v pecích při teplotě asi 1000 °C. Tudíž, uhlíková stopa výroby křemelin je poměrně vysoká. Dále, křemelinina je určena pro jednorázové použití, což vede k tvorbě velkého množství pevného odpadu (zhruba 50 % celkového objemu pevného odpadu pivovaru). Konečně musí být vzata v úvahu riziko vdechování křemelinou způsobující plicní onemocnění. Použití membrán vyžaduje vyšší spotřebu chemikálií, ale jejich opětovné použití může snížit jejich spotřebu až o třetinu. Spotřeba vody pro křemelinovou a membránovou filtraci je srovnatelná, typicky 0,05 až 0,10 hl/hl piva. Regenerační membrány s typickou životností 400 filtračních cyklů mají výrazně nižší uhlíkovou stopu ve srovnání s křemelinovou filtrací (Mol, 2014).

6.7 Membránová filtrace nealkoholického piva

Díky svému složení má nealkoholické pivo odlišné vlastnosti (hustota, viskozita, suspendované a rozpustné částice) než pivo alkoholické, což se významně projeví při jeho filtraci. Tyto odlišnosti je zapotřebí vzít v úvahu při výběru vhodné filtrační technologie. Studie autorů Yazdanshenas a kol. se zabývá charakterizací vlastností nealkoholického piva a jejich vlivem na průběh membránové filtrace s zacílením na blokační mechanismy a jejich popis. Při filtraci nealkoholického piva na keramických cross flow membránách s póry o velikosti 0,45 µm byl potvrzen vztah mezi počtem částic v roztoku a zákalem vzorku. Byly popsány dva základní mechanismy snižující průtok filtrovaného piva, a to ucpávání pórů během prvních 15 minut filtrace a tvorba filtračního koláče od 20 minut. Filtrační koláč včetně gelové vrstvy přispívá 95 % k celkovému odporu a má největší vliv na pokles průtoku. Ireverzibilní blokáce membrány (zejména ucpávání pórů) přispívá k celkovému odporu pouhými 4%. (Yazdanshenas et al., 2010a).

Pro mikrofiltraci nealkoholického piva byly testovány různé typy membrán o rozdílné velikosti pórů. Experimentálně bylo potvrzeno, že mezi membránami z acetátu celulózy (CA), nitrátu celulózy (CN) a nylonu (NY) nebyly zjištěny významné rozdíly a průtoky během filtrace pomocí těchto membrán velmi rychle klesaly. Membrána z polytetrafluoroethylenu (PTFE) nebyla při tlaku 1 bar propustná, při tlaku 2 bary se průtok nejprve zvýšil a teprve po určité době klesl. U membrány CN byl pozorován nejvyšší záchyt rozpuštěných částic a zákalotvorných proteinů, zatímco na membráně NY byl nejvyšší pokles polyfenolů a barvy. Nízká selektivita PTFE membrány může být způsobena její hydrofobicitou a tedy slabšími interakcemi se zákalotvornými proteiny (Yazdanshenas et al., 2010b).

7 ZÁVĚR

Filtrace je nepostradatelnou součástí výroby piva s prodlouženou trvanlivostí. Tak jako se v pivovarství procesy a postupy přizpůsobují novým požadavkům, také technologie filtrace piva zaznamenává nové trendy. Základním problémem už dávno není jen vyrobit kvalitní jiskrné pivo, důraz je kladen i na rychlost filtrace, délku filtračního cyklu a v nemalé míře na dopad na životní prostředí. I když většina studií poukazuje na nižší „uhlíkovou stopu“ membránové filtrace oproti naplavovací a ve světě je membránová filtrace stále více používána, je otázkou, zda je tato technologie vhodná pro filtraci piva s vyšším zbytkovým extraktem, neboť je zde větší riziko zanášení pórů, což vede ke zkrácení doby filtračního cyklu a zvyšuje náklady na filtraci. Proto je cílem výzkumu podrobně popsat mechanismus zanášení pórů a upravit technologii membránové filtrace tak, aby byly uvedené nedostatky eliminovány na minimum.

PODĚKOVÁNÍ

Tato studie vznikla za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu TE02000177 „Centrum pro inovativní využití a posílení konkurenceschopnosti českých pivovarských surovin a výrobků“.

the kieselguhr, and membrane filtration is increasingly used worldwide, it is questionable whether this technology is suitable for filtering beer with a higher residual extract as there is a greater risk of pores becoming blocked, which leads to a shorter filter cycle time and increases the cost of filtration. Therefore, the aim of the future research is to describe in detail the mechanism of pore fouling and to modify the membrane filtration technology to minimize all deficiencies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by project TE02000177 „Center for Innovative Use and Strengthening of Competitiveness of Czech Brewery Raw Materials and Products“ of the Technology Agency of the Czech Republic.

REFERENCES / LITERATURA

- Ambrosi, A., Cardozo, N. S. M., Tessaro, I. C., 2014: Membrane Separation Processes for the Beer Industry: a Review and State of the Art. *Food Bioprocess Technol.*, 7:921–936.
- Basařová, G., Šavel, J., Basař, P., Lejsek, T., 2010: Pivovarnictví – Teorie a praxe výroby piva. Vydavatelství VŠCHT Praha, Praha.
- Benítez, E. I., 2013: Turbidimetric Behavior of Colloidal Particles in Beer Before Filtration Process, *Food Bioprocess Technol.*, 6:1082–1090.
- Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., Sillanpää, M., 2013: An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal* 219: 499–511.
- Bílek, 2016: on-line: <https://filtrace.com/cross-flow-filtr>. (Accessed June 6, 2018)
- Braun, F., Hildebrand, N., Wilkinson, S., Back, W., Becker, T., 2011.: Large-scale study on beer filtration with combined filter aid additions to cellulose fibres, *J. Inst. Brew.* 117: 314–328.
- Briggs, D., Boulton, C., Brookes, P., Stevens, R., 2004: *Brewing science and practice*. London, Boca Raton: CRC Press: 881. ISBN 130978-0849325472
- Gertsman, A., 2017: Beer clarification with modern centrifugal separators. *Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am.* 54: 38–40
- Hippmann, S., Eßlinger, H. M., Bertau, M., 2016: Alginate – A Novel Filter Aid in Precoat and Cake Filtration. *Brewing Science*, 68: 26–32.
- Iritani, E., Katagiri, N., 2016: KONA Powder and particle *Journal No.* 33: 179–202.
- Jin, Y-L., Speers, R. A., Paulson, A. T., Stewart, R. J., 2004: Effect of β -glucans and process conditions on the membrane filtration performance of beer. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, 62: 117–124.
- Juillerat, A., 1952: La filtration de la bière sur kieselguhr et son automatisation. Deuxième congrès international des industries de fermentation, Gand, 1952: 231–236.
- Kahler, M., Voborský, J., 1981: Filtrace piva, SNTL, Praha: 304.
- Kuiper, S., van Rijn, C. J. M., Nijdam, W., Raspe, O., van Wolferen, H. A. G. M., Krijnen, G. J. M., Elwenspoek, M. C., 2002: Filtration of lager beer with microsieves: Flux, permeate haze and in-line microscope observations. *Journal of membrane science*, 196: 159–170.
- Kupetz, M., Aumer, J., Harms, D., Zarnkow, M., Sacher, B., Becker, T., 2017: High-throughput β -glucan analyses and their relationship with beer filterability. *European Food Research and Technology*, 243: 341–351.
- Kupetz, M., Zarnkow, M., Sacher, B., Becker, T., 2015a: Interactions between dissolved β -glucans and medium chain fatty acid ethyl esters in model beer solution and their impact on the filterability. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, 73: 323–330.
- Kupetz, M., Weber, M., Kollmannsberger, H., Sacher, B., Becker, T., 2015b: Impact of fatty acids and medium chain fatty acid ethyl esters on the beer crossflow membrane filtration. *Brewing Science*, 68 (September/October): 122–129.
- Larsen, L. B., Wichmann, T. B., Sørensen, J. F., Miller, L. B., 2015: Pitfalls and gains from applying xylanases in brewing. *Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am.*, 52: 165–168.
- Masák, G., Basařová, G., Šavel, J., 1988: Über die Bedeutung suspendierter Partikeln von β -Glukan für die Filtrierbarkeit des Bieres. *M Schr. Brauwissenschaft*, 41: 435–440.
- Mikulec, M., 2016: bakalářská práce: Filtrace v technologii výroby piva. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní
- Moll, M., 1994: *Beers and Coolers*, Intercept, Andover: 495. ISBN 1-898298-2
- Mol, M., 2014: Beer membrane filtration (BMF): Does it fit for U.S. breweries? A technological and economic analysis. *Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am.*, 51: 54.
- Sensidoni, M., Marconi, O., Perretti, G., Freeman, G., Fantozzi, P., 2011: Monitoring of Beer Filtration Using Photon Correlation Spectroscopy (PCS), *J. Inst. Brew.*, 117(4), 639–646.
- Stewart, D. C., Hawthorne, D., Evans, D. E., 1998: Cold sterile filtration: a small scale filtration test and investigation of membrane plugging. *J. Inst. Brew.*, 104: 321–326.
- Van der Sman, R. G. M., Vollebregta, H. M., Mepschen, A., Noordman, T. R., 2012: Review of hypotheses for fouling during beer clarification using membranes, *J. Membrane Science*, 396: 22–31.
- Yazdanshenas, M., TabatabaeiNejad, S.A.R., Soltanieh, M., Tavakoli, A., Babaluo, A. A., Fillaudeau, L., 2010a: Dead-end microfiltration of rough nonalcoholic beer by different polymeric membranes. *Am. Soc. Brew. Chem.*, 68: 83–88.
- Yazdanshenas, M., Soltanieh, M., Nejad, S. A. R. T., Fillaudeau, L., 2010b: Cross-flow microfiltration of rough non-alcoholic beer and diluted malt extract with tubular ceramic membranes: Investigation of fouling mechanisms. *J. Membrane Science*, 362: 306–316.
- Yano, M., Back, W., Krottenhaler, M., 2008: The impact of low heat load and activated carbon treatment of second wort on beer taste and flavour stability. *J. Inst. Brew.*, 114: 357–364.
- Zacharias, J., Schneid, R., Scholz, R., 2017: Precoating filtration with compressible filtering aids featuring viscose fibres. *Brewing Science*, 69: 101–117.
- Zuber, J., 2014: Sustainability of beer filtration. *Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am.*, 51: 110–112.

Manuscript received / Do redakce došlo: 18/05/2018
Accepted for publication / Přijato k publikování: 26/06/2018