

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

VÝROBA A ÚPRAVA STLAČENÉHO VZDUCHU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

ZUZANA LINHARTOVÁ

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

V Praze dne 10. června 2016

.....
Jméno a Příjmení

Poděkování

Chtěla bych poděkovat doc. Ing. Radkovi Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, za poskytnutí připomínek a rad a vstřícný přístup při konzultacích.

Poděkování patří i mé rodině za podporu a trpělivost.

Anotační list

Jméno autora: Zuzana

Příjmení autora: Linhartová

Název práce česky: Výroba a úprava stlačeného vzduchu

Název práce anglicky: Production and treatment of compressed air

Rozsah práce:

počet stran:	39
počet obrázků:	20
počet tabulek:	4
počet příloh:	7

Akademický rok: 2015/2016

Jazyk práce: Český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.

Oponent:

Konzultant práce:

Zadavatel:

Anotace česky: Bakalářská práce se zabývá výrobou a úpravou stlačeného vzduchu a jeho použitím. V první části jsou uvedeny příklady využití stlačeného vzduchu v průmyslových odvětvích, dále práce obsahuje popis několika nejčastěji používaných typů kompresorů. Další kapitola je věnována zařízením na úpravu stlačeného vzduchu, jako jsou sušičky, filtry, odlučovače kondenzátu a odvaděče kondenzátu. Poslední část práce obsahuje návrh kompresorové stanice.

Anotace anglicky: The bachelor thesis deals with the production and treatment of compressed air and his consecutive utilization. In the first part there are examples of usage of compressed air in the industry then there is a description of the most used types of compressors. The following chapter is dedicated to the devices for the compressed air treatment such as dryers, filters, separators and condensate drain. In the end of the thesis there is a design of compressor station.

Klíčová slova: Stlačený vzduch, kompresor, sušičky, filtry, kompresorová stanice

Využití: Základní přehled o výrobě a úpravě stlačeného vzduchu.

Obsah

1. Stlačený vzduch a jeho využití	7
1.1 Použití stlačeného vzduchu	7
2. Výroba stlačeného vzduchu	8
2.1 Rozdělení kompresorů podle způsobu stlačování	8
2.2 Rozdělení kompresorů podle tlaku	9
2.3 Pístové kompresory	10
2.4 Membránové kompresory	11
2.5 Šroubové kompresory	11
2.6 Turbokompresory	12
2.7 Proudové kompresory (Ejektory)	14
3. Úprava stlačeného vzduchu	14
3.1 Vlhkost stlačeného vzduchu	15
3.1.1 Metody vysoušení stlačeného vzduchu	16
3.1.2 Kondenzační sušení	17
3.1.2 Adsorpční sušení	19
3.1.3 Absorpční sušení	21
3.1.4 Difuzní sušení	22
3.2 Filtry	23
3.2.1 Sací filtry	24
3.2.2 Filtry stlačeného vzduchu	25
3.3 Odlučovače kondenzátu	26
3.4 Odvaděče kondenzátu	27
4. Kompresorové stanice	28
4.1 Návrh kompresorové stanice	28
4.2 Volba kompresoru	29
4.3 Zařízení pro filtraci, sušení, odvod a separaci kondenzátu	29
4.4 Návrh průměru potrubí	31
4.5 Tlaková ztráta	33
5. Závěr	34
Přílohy	35
Citovaná literatura	38

1. Stlačený vzduch a jeho využití

Stlačený vzduch je dnes vedle elektrické energie jedním z nejčastěji používaných zdrojů energie. Používá se téměř ve všech odvětvích průmyslu i v každodenním životě. Vzduch je všude dostupný, není hořlavý, jedovatý, za běžných podmínek není horký ani nekondenzuje. Jeho provoz je čistý a suchý, takže při netěsnostech rozvodu nehrozí znečištění okolí unikajícím médii. Stlačený vzduch je dobře skladovatelný v tlakových nádobách a je možné ho plynule regulovat. Na rozdíl od elektrických strojů neexistuje nebezpečí zkratu a je obecně spolehlivý a bezpečný i v podmínkách, kde hrozí například výbuch.

Jedná se o sekundární zdroj energie, tj. energie získané přeměnou primární energie, jeho výroba je značně nákladná. Stlačený vzduch je považován za jednu z nejdražších energií, pneumatický motor využije asi jen 25% energie vynaložené na pohon kompresoru. Negativem je také nutnost úpravy stlačeného vzduchu, jeho čištění od pevných částic, oleje a vlhkosti.

1.1 Použití stlačeného vzduchu

Energii stlačeného vzduchu lze převést na mechanickou energii pomocí pneumatických motorů. Práce je zde vykonána změnou tlaku a objemu vzduchu, pneumatické motory mohou vykonávat rotační i přímočarý pohyb. Stlačený vzduch může fungovat sám jako pracovní médium, např. při provzdušňování kapalin, zkapalňování vzduchu a čištění forem a náradí. Pneumatické mechanismy pak slouží k ovládání a řízení strojů a procesů.

Zde je uvedeno několik příkladů použití stlačeného vzduchu v průmyslových odvětvích:

Stavebnictví – Vrtací a bourací pneumatická kladiva, dopravníky pro beton a maltu, úprava povrchů tryskáním, zafukování optických kabelů, pohon robotů pro opravy potrubí.

Těžební průmysl – Sekací pneumatická kladiva, posuvná zařízení, ventilační systémy, ložářské vrtací soupravy, vrtání hlubokých studní.

Chemický průmysl – Výroba kyslíku.

Energetika - Zajíždění a vyjíždění palivových tyčí, vzdálené řízení ventilů a šoupátek v parním a chladícím oběhu.

Zdravotnictví – Pohon zubní vrtačky.

Hutnictví – Redukce uhlíku při výrobě oceli, chlazení nástrojů a zařízení.

Výroba plastických hmot – Řezací a svařovací zařízení, zamykací mechanismus pro licí formu.

Potravinářský průmysl – Plnicí a uzavírací zařízení, etiketovací stroje.

Doprava – Brzdy v nákladních autech a kolejových vozidlech, startování velkých diesellových motorů.

Textilní průmysl – Upínací a polohovací zařízení u šicích strojů, šicí jehla a chladicí systém, vyfukování zbytků materiálu a prachu.

2. Výroba stlačeného vzduchu

K výrobě stlačeného vzduchu se používají kompresory, které nasávají plyny a páry a stlačují je na požadovaný tlak. Vynaložením mechanické energie se zvyšuje tlaková energie nasávaného plynu.

Základní hodnoty charakterizující kompresor (1):

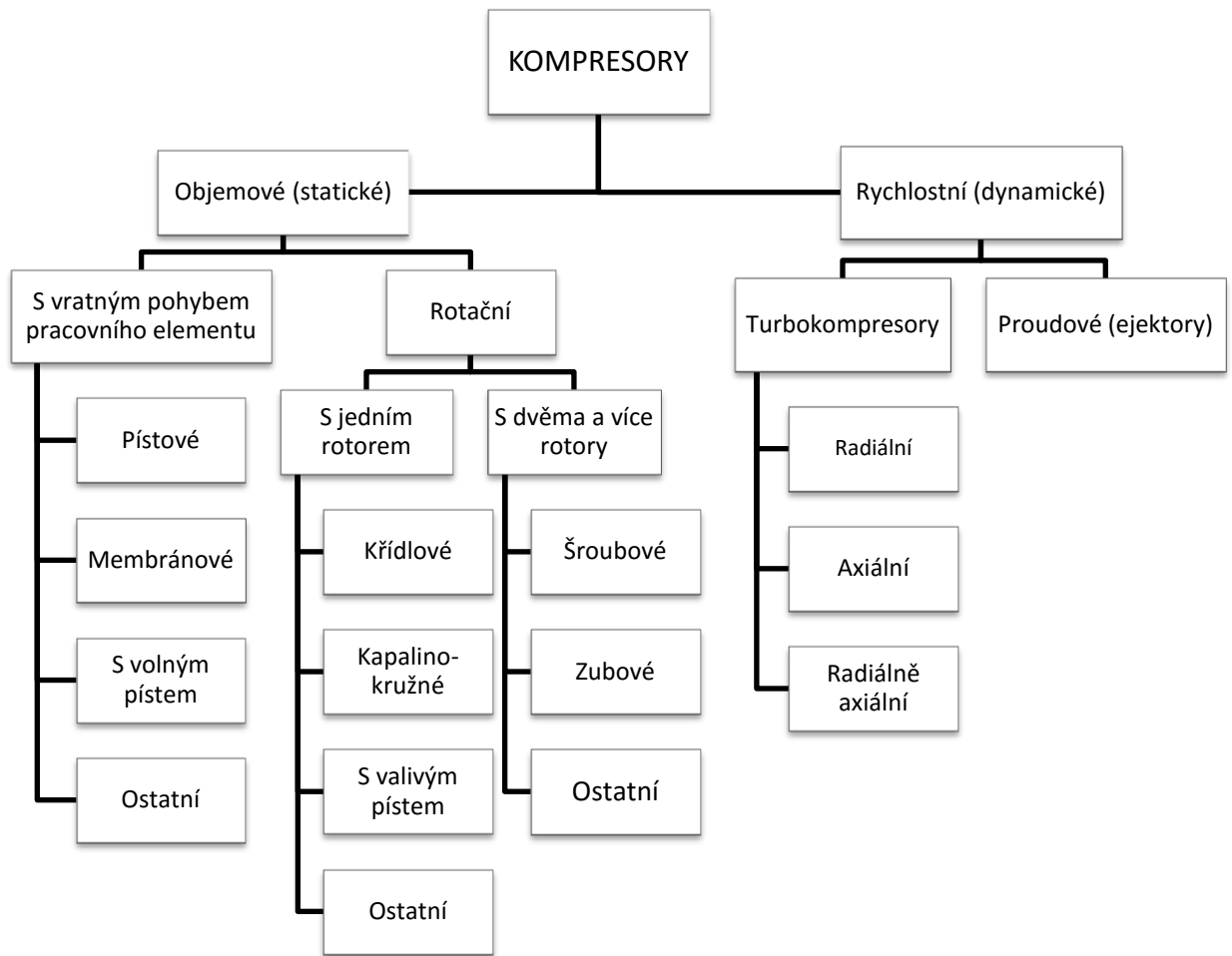
- Výkonnost – Objemový tok Q [m^3/s , m^3/h , ...] – Průtok vzduchu výtlačným hrdlem při jmenovitém tlaku, otáčkách a teplotě.
- Tlakový poměr - $\sigma = \frac{p_2}{p_1}$ (1)
 - Poměr absolutního výtlačného tlaku P_2 k sacímu tlaku p_1 .
- Výtlačný tlak – Udává se nejčastěji jako přetlak (přetlak = tlak absolutní – tlak barometrický).
- Efektivní příkon P_e – Příkon na hřídeli kompresoru.

2.1 Rozdělení kompresorů podle způsobu stlačování

Podle způsobu stlačování se kompresory dělí na objemové a rychlostní (Obrázek 1). U objemových kompresorů je po nasátí stlačovaného vzduchu pracovní prostor úplně uzavřen a jeho postupným zmenšováním dochází ke zvyšování tlakové energie. Periodické změny pracovního prostoru se dosáhne přímočarým vratným pohybem pístu u pístových kompresorů, prohýbáním pružné membrány u membránových kompresorů a rotačním pohybem pístu u rotačních kompresorů. Objemové kompresory se používají pro malé a střední objemové toky (do 6 000 m^3/h).

U dynamických kompresorů, které se dělí na turbokompresory (lopatkové) a proudové, zůstává pracovní prostor neměnný. V oběžném kole se urychluje nasátý plyn, a tím se

zvyšuje jeho kinetická energie, ve statoru se kinetická energie mění na tlakovou. Tento typ se používá hlavně pro velké objemové toky (od 6 000 m³/h).



Obrázek 1: Rozdělení kompresorů (2)

2.2 Rozdělení kompresorů podle tlaku

Vývěva – stlačuje vzduch z tlaku nižšího než je atmosférický na atmosférický tlak. Je to zařízení, které odčerpává vzduch z uzavřeného prostoru a vytváří částečné vakuum.

Dmychadlo – stlačuje atmosférický vzduch na přetlak do 200 kPa.

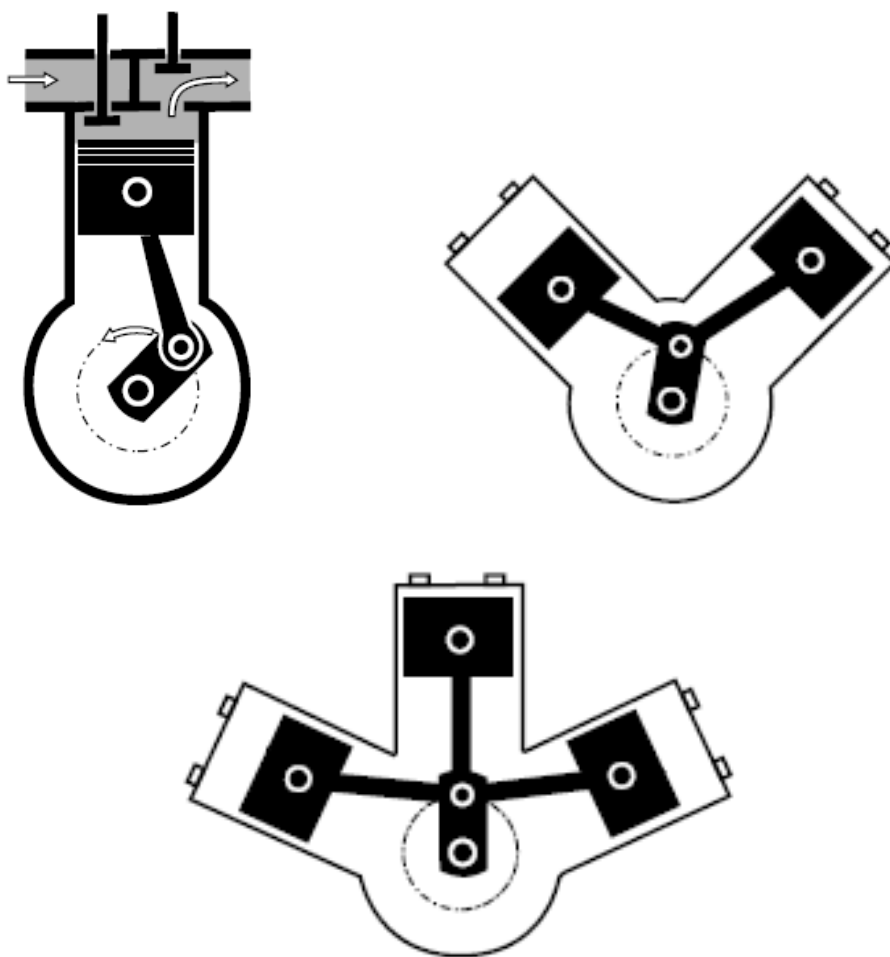
Dotlačovací kompresor – je zařazován před sání např. chladivových kompresorů, při příliš velkém tlakovém poměru.

Cirkulační kompresor (cirkulátor) – nasává plyn o vysokém tlaku a stlačuje ho s malým tlakovým poměrem. Je určen pro udržování tlaku v chemických provozech.

2.3 Pístové kompresory

U pístových kompresorů se dosahuje změny objemu plynu přímočarým vratným pohybem pístu ve válci. Plyn je střídavě nasáván sacím ventilem, stlačován a vytlačován výtlačným ventilem. Pístové kompresory jsou schopné dosahovat nejvyšších výtlačných přetlaků, používají se například v chemickém průmyslu pro stlačování různých plynů.

Pístové kompresory mohou být jedno až sedmistupňové. Jednostupňové mívají maximální výtlačný přetlak do 1 000 kPa, u vícestupňových je možné dosáhnout až 70 000 kPa. Vzduch se stlačí v prvním stupni, následuje jeho ochlazení a stlačení v dalším stupni, přičemž zdvihový objem druhého stupně je vždy menší než prvního. Při stlačování se vytváří teplo, které je třeba odvádět, buď vzduchem, nebo vodou. Pístové kompresory se staví jako stojaté, ležaté, boxerové, úhlové s válci do V, W (jako na obrázku 2) do L, jednočinné nebo dvočinné, mazané nebo bezmazné.



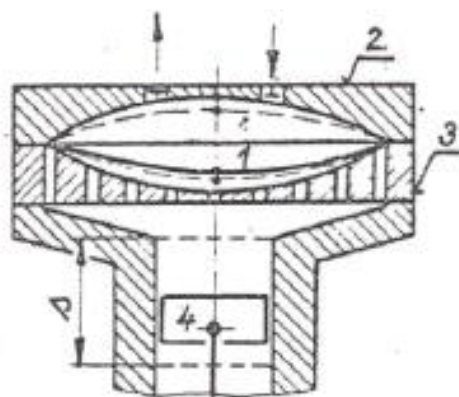
Obrázek 2: Pístový kompresor stojatý a úhlové s válci do V a W (3)

2.4 Membránové kompresory

Membránové kompresory jsou zvláštním druhem pístových kompresorů, které nemají pevný píst ale pružnou kruhovou membránu, která je po obvodu připevněna, a jejíž prohýbání způsobuje stlačování plynu. Membránové kompresory jsou bezmazné, což zaručuje vzduch bez přítomnosti oleje. Kvůli malému zdvihu se používají především pro stlačování malých objemů vzácných nebo nebezpečných plynů, protože je možné u nich zaručit vysokou těsnost.

U jednodušších strojů se používá měkká, pryžová membrána, která je ovládána mechanicky. U jednostupňového provedení je možné dosáhnout přetlaku až 300 kPa, u dvoustupňového až 600 kPa.

Pro vyšší tlakový poměr se používá kovová hydraulicky ovládaná (ocelová) membrána, která je sevřena mezi dvě desky s mělkým kulovým vybráním, jak je naznačeno na obrázku 3. Spodní deska je děrovaná, čímž je prostor pod membránou spojen s válcem olejového pístového čerpadla. Sací i výtlačný ventil je umístěn v horní desce. Nevýhodou je velká hmotnost takovýchto kompresorů, membránové kompresory se používají hlavně ve farmaceutickém, potravinářském a chemickém průmyslu.

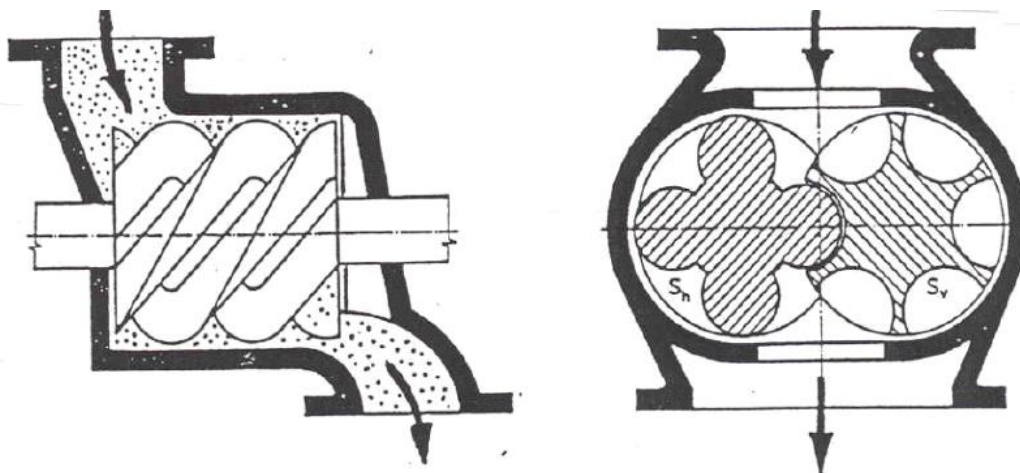


Obrázek 3: Membránový kompresor s hydraulicky ovládanou membránou (4)

2.5 Šroubové kompresory

Jsou to objemové rotační kompresory, u kterých se zvýšení tlaku plynu dosáhne zmenšením objemu párových komůrek mezi šroubovými zuby obou rotorů. Plyn je nasáván na sací straně do prostoru mezi zuby obou rotorů, je postupně stlačován a výtlačným otvorem dopravován do potrubí (Obrázek 4). Rotory jsou šroubová tělesa s velkým stoupáním a nestejným počtem zubů, která se točí v opačných směrech. Hlavní rotor má zuby s vypouklým, nesymetrickým profilem, který zaručuje nejmenší objemové ztráty, vedlejší rotor má zuby vyduté.

Výhodou šroubových kompresorů je jednoduchá, robustní konstrukce bez ventilů a malá zastavěná plocha. Nevýhodou představuje vestavěný tlakový poměr, který není možné měnit, a hlučnost.



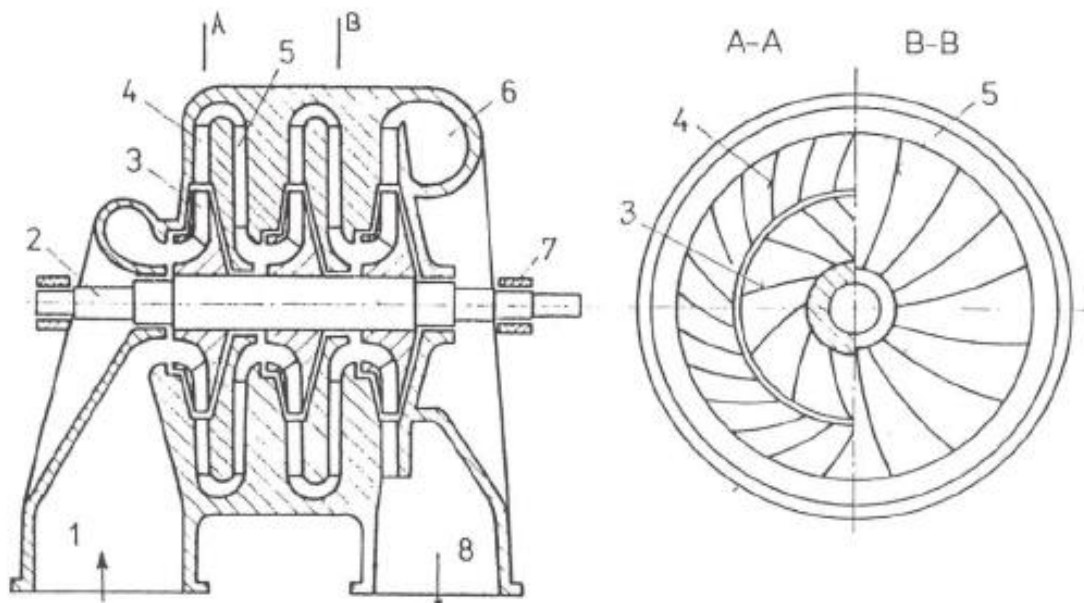
Obrázek 4: Schéma šroubového kompresoru (4)

Šroubové kompresory se dělí na bezmazné a mazané. U suchých šroubových kompresorů jsou rotory na sebe vázány párem ozubených synchronizačních kol tak, aby se plochy vzájemně nedotýkaly. Ve většině případů však není vyžadována úplná absence oleje ve stlačeném vzduchu, a proto se používají jednodušší mazané šroubové kompresory. Poháněn je jen hlavní rotor a díky vstřikování oleje se zvyšuje těsnost rotorů, což umožňuje dosáhnout vyššího tlakového poměru.

2.6 Turbokompresory

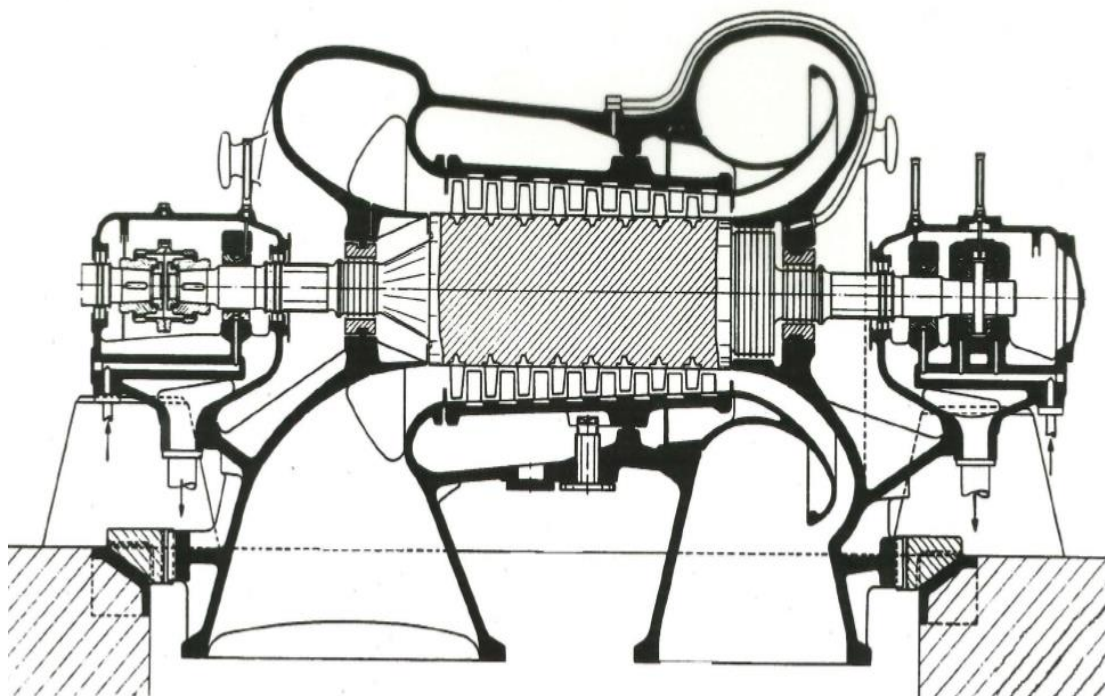
Řadí se mezi rychlostní (dynamické) kompresory. Nasávaný plyn se na oběžném kole částečně stlačí a urychlí a v difuzoru se změjí kinetická energie na tlakovou. Podle průtoku plynu v oběžném kole se turbokompresory dělí na radiální a axiální. Výhodou proti pístovým kompresorům je stlačený vzduch bez oleje, klidný chod a jednodušší obsluha a vysoká spolehlivost provozu. Nevýhodou jsou vysoké otáčky, vysoká minimální hranice výkonnosti, citlivost při změně tlaku a hlučnost.

U radiálního kompresoru proudí vzduch do oběžného kola a odstředivou radiální silou proudí do difuzoru. Vratným kanálem je částečně stlačený plyn přiváděn do sání dalšího stupně. Posledním stupněm je výstupní spirálová skříň a výtlačné hrdlo. Na obrázku 5 je vyobrazen třístupňový radiální turbokompresor. Tlakový poměr v jednom stupni většinou nepřekročí hodnotu $\sigma = 2$, a proto je nutné pro dosažení požadovaného tlakového poměru zařadit více stupňů za sebou. Na oběžném kole se vyskytují vysoké obvodové rychlosti 110 až 380 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ s otáčkami 3 000 až 80 000 min^{-1} . Výkonnost se pohybuje od 1 000 do 300 000 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, výtlačný přetlak může dosáhnout až 45 MPa. (1)



Obrázek 5: Třístupňový radiální turbokompresor (1)

Do axiálního turbokompresoru vstupuje plyn sacím hrdlem do vstupní komory s předřazeným statorem. Plyn je opět urychlován oběžnými lopatky a na difuzorových lopatkách dochází k navýšení tlaku, avšak v tomto případě plyn při průchodu nemění svůj směr a stále proudí axiálně (na obrázku 6 zleva doprava). Oběžné lopatky jsou vsazeny do vyfrézovaných drážek válcového nebo mírně kuželovitého bubnu, difuzorové jsou spojeny s tělem statoru. Obvodová rychlost oběžného kola bývá do $260 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při otáčkách od $3\,000$ do $20\,000 \text{ min}^{-1}$. Výkonnost může být $10\,000$ až $2\,500\,000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, při tlaku plynu na výstupu až 2 MPa .



Obrázek 6: Axiální turbokompresor (5)

2.7 Proudové kompresory (Ejektory)

Ejektory jsou rychlostní kompresory, ve kterých se využívá tlakové energie páry nebo vzduchu ke stlačování. Stlačený vzduch se přivede do pracovní dýzy, kde je mu udělena nadkritická rychlost. Z ní pak vstupuje do směšovací komory, kde nasává stlačovaný vzduch a v difuzoru se kinetická energie směsi mění na tlakovou (Obrázek 7). Přetlak hnačícího plynu bývá kolem 400 až 800 kPa. (1)

Ejektory slouží k odsávání a stlačování plynů a par v potravinářském a chemickém průmyslu.



Obrázek 7: Proudový kompresor (6)

3. Úprava stlačeného vzduchu

Pro různé aplikace stlačeného vzduchu jsou doporučované různé třídy kvality vzduchu určené normou ISO 8573.1 „Stlačený vzduch pro všeobecné použití“. Tato norma hodnotí kvalitu stlačeného vzduchu podle koncentrace a velikosti pevných částic, vlhkosti a koncentrace oleje. Hodnoty těchto parametrů pro jednotlivé třídy udává tabulka 1. (1)

Třída kvality	Pevné částice		Vlhkost	Olej
	Maximální velikost [μm]	Koncentrace [mg.m ⁻³]	Tlakový rosný bod* [°C]	Koncentrace [mg.m ⁻³]
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1
4	15	1	3	5
5	40	10	7	25
6	-	-	10	-

Tabulka 1: Třídy kvality vzduchu dle ISO 8573.1

*Tlakový rosný bod při teplotě vzduchu 20°C a přetlaku 700 kPa

1 m³ atmosférického vzduchu obsahuje až 180 milionů částic nečistot velkých od 0,01 do 100 μm, 5 - 40 g vody ve formě vodní páry a 0,01 až 0,03 mg/m³ oleje ve formě aerosolu. Kompresory tento vzduch nasávají a po stlačení se koncentrace nečistot mnohokrát zvýší. Kromě toho se ve stlačeném vzduchu ocitá ještě olej z maziva a částice otěru z kompresoru. Správná úprava vzduchu chrání zařízení za kompresorem proti těmto nečistotám, a tím zvyšuje jejich životnost a snižuje náklady na údržbu. (3)

3.1 Vlhkost stlačeného vzduchu

Atmosférický vzduch obsahuje vždy vodní páru. Její množství je závislé na množství plynu, jeho teplotě a tlaku. Vlhkost vzduchu se mění také v závislosti na ročním období; v letních měsících bývá ve vzduchu větší množství vody v plynném i kapalném skupenství.

Vlhkost plynu udává:

Relativní vlhkost - φ [%]

$$\varphi = \frac{p_A}{p_A''} \cdot 100 \quad (2)$$

Je to poměr mezi skutečným množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch při plném nasycení a při stejném tlaku a teplotě.

Měrná vlhkost - x [kg/kg]

$$x = \frac{m_{H_2O}}{m_{s.v.}} \quad (3)$$

Udává hmotnost vodní páry vztaženou na hmotnost suchého vzduchu.

Absolutní vlhkost - f [g.m⁻³]

$$f = \frac{m}{V} \quad (4)$$

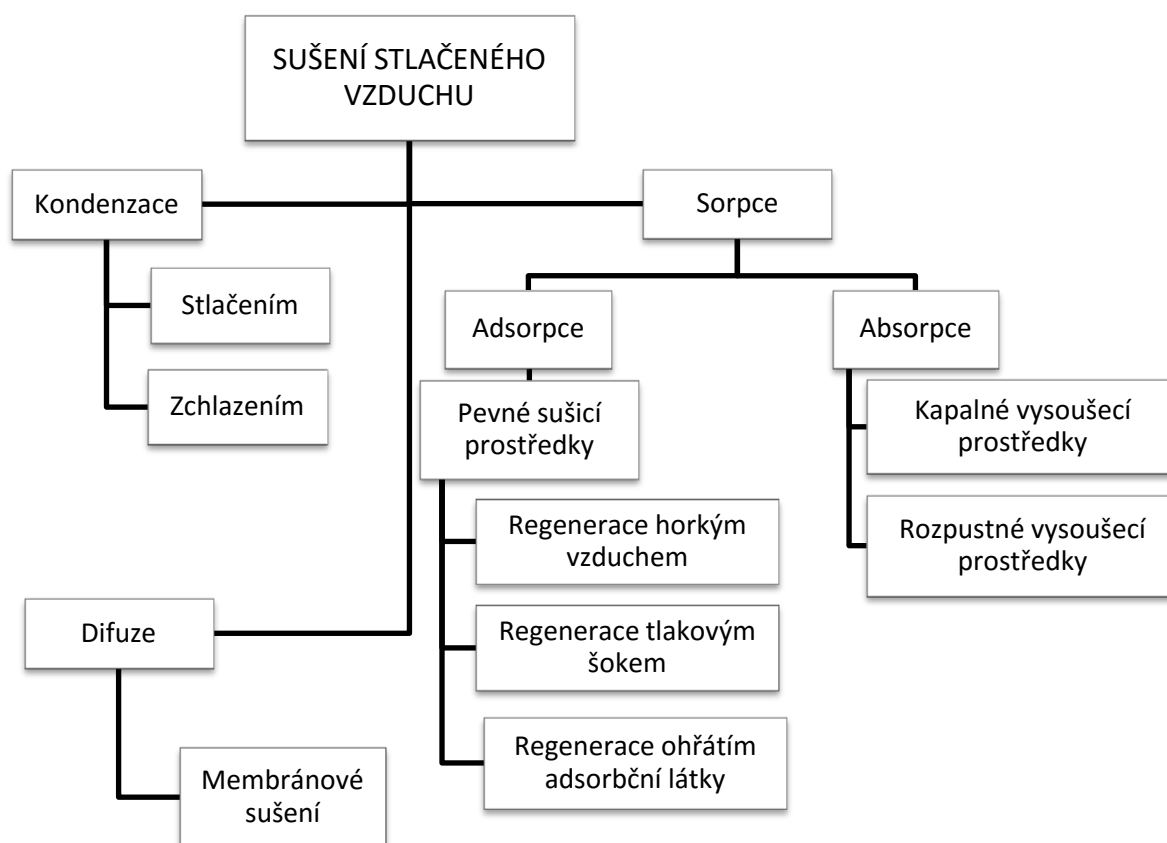
Je to skutečná hmotnost vlhkosti v 1 m³ plynu při dané teplotě a tlaku.

Pro vysoušení vzduchu je důležitý tlakový rosný bod. Je to teplota, při které je stlačený vzduch nasycený, a tedy pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace. U chladicích sušiček to obvykle udává nejnižší teplotu vzduchu, které může být při daném tlaku dosaženo. Tlakový rosný bod upraveného vzduchu se volí podle druhu aplikace, doporučuje se, aby byl asi o 10°C nižší než převažující teplota okolí.

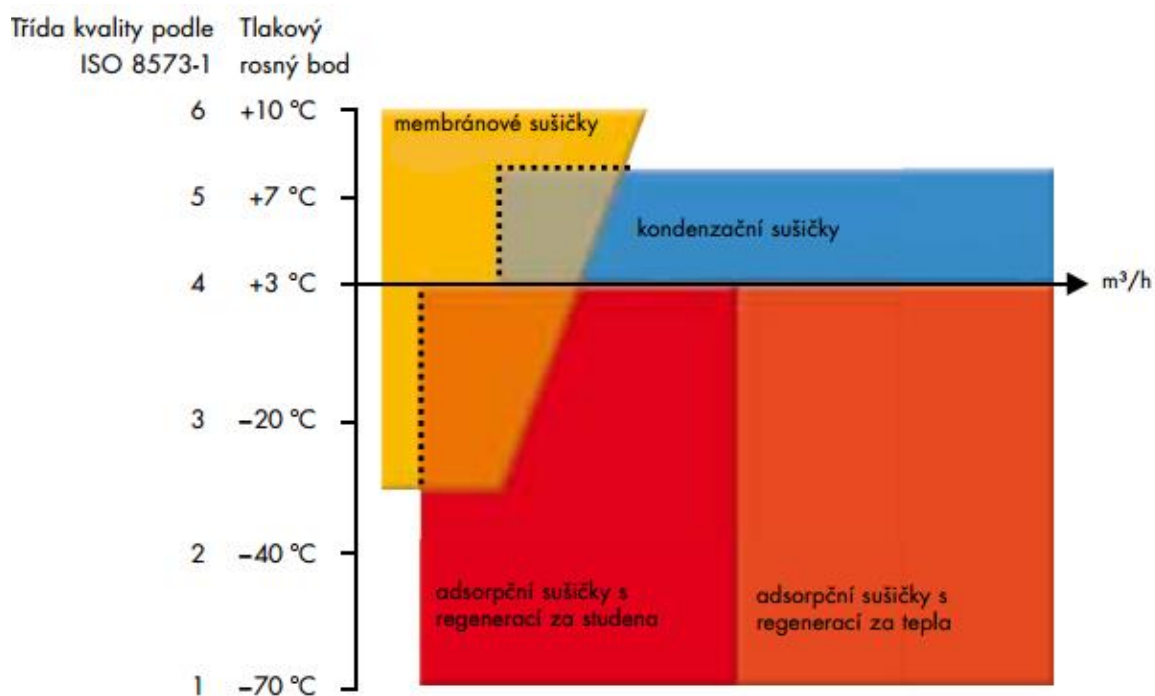
3.1.1 Metody vysoušení stlačeného vzduchu

Pokud voda zůstane v plynném skupenství, neomezuje nijak chod zařízení. Jakmile však začne kondenzovat, může způsobit poruchy a jiné problémy. Proto je nutné vodní páru ze stlačeného vzduchu odloučit. Uvádí se tři způsoby pro dosažení zvoleného tlakového rosného bodu: kondenzace, sorpce a difuze.

Kondenzace znamená, že se vodní pára zkapalní při podchlazení pod žádaný tlakový rosný bod a následně se odvede. Při sorpci se vodní pára váže na sušící látku účinkem mezimolekulárních přitažlivých sil (adsorpce) nebo na základě rozdílných rozpustností látek ve vodě (absorpce). Rozdělení metod vysoušení stlačeného vzduchu je na obrázku 8 a rozdělení základních druhů sušiček podle výkonnosti a možného tlakového rosného bodu na obrázku 9.



Obrázek 8: Metody sušení stlačeného vzduchu (1)

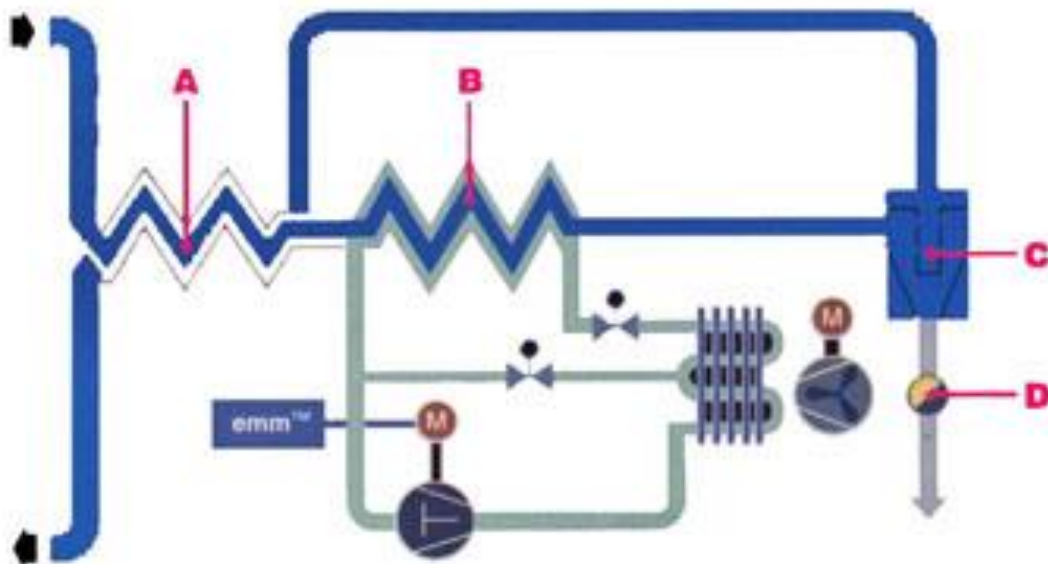


Obrázek 9: Pracovní oblasti sušiček (7)

3.1.2 Kondenzační sušení

Kondenzační sušičky

Kondenzační sušení je nejčastější a nejlevnější způsob vysoušení stlačeného vzduchu v běžných provozech. Funguje na principu ochlazení proudu stlačeného vzduchu na teplotu tlakového rosného bodu. Při snižování teploty se zvyšuje relativní vlhkost vzduchu, a když je vzduch plně nasycený, začíná vodní pára kondenzovat. Omezením je teplota tlakového rosného bodu 0°C, při které dochází namrzání vody na výparník. Ve skutečnosti je však možné dosáhnout tlakového rosného bodu jen okolo 2°C, což pro většinu provozů dostačuje.



Obrázek 10: Schéma kondenzační sušičky (8)

Na obrázku 10 je schéma kondenzační sušičky. Teplý a vlhký stlačený vzduch je předchlazován studeným výstupním vzduchem v tepelném výměníku (A). Toto předchlazení probíhá bez přívodu vnější energie.

Následovně vzduch vstupuje do tepelného výměníku (B), kde se vzduch pomocí chladicího média zchladí na požadovaný tlakový rosný bod. Vodní pára zkondenzuje a vzduch s kapkami vody vstupuje do odlučovače (C), kde se kondenzát odvádí pryč. Již suchý vzduch se vrací zpět přes tepelný výměník, kde předchlazuje ještě nevysušený vzduch, a vystupuje ze sušičky. (9)

Kompresní sušičky

Vysoušený vzduch se v kompresoru nejdříve stlačí na tlak výrazně vyšší, než je požadovaný provozní tlak. Pak se tento vzduch intenzivně ochladí ve výměníku tepla a v dochlazovači. Kondenzát se odvede a vzduch expanduje zpět na provozní tlak. Objem vzduchu se zvětší, ale množství vlhkosti zůstává zachováno, čímž se jeho relativní vlhkost sníží.

Tímto způsobem lze dosáhnout tlakového rosného bodu až $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou je jednoduché a spolehlivé zařízení, které je ekonomické hlavně pro malé výkonnosti. Nevýhodou je velká energetická náročnost.

3.1.2 Adsorpční sušení

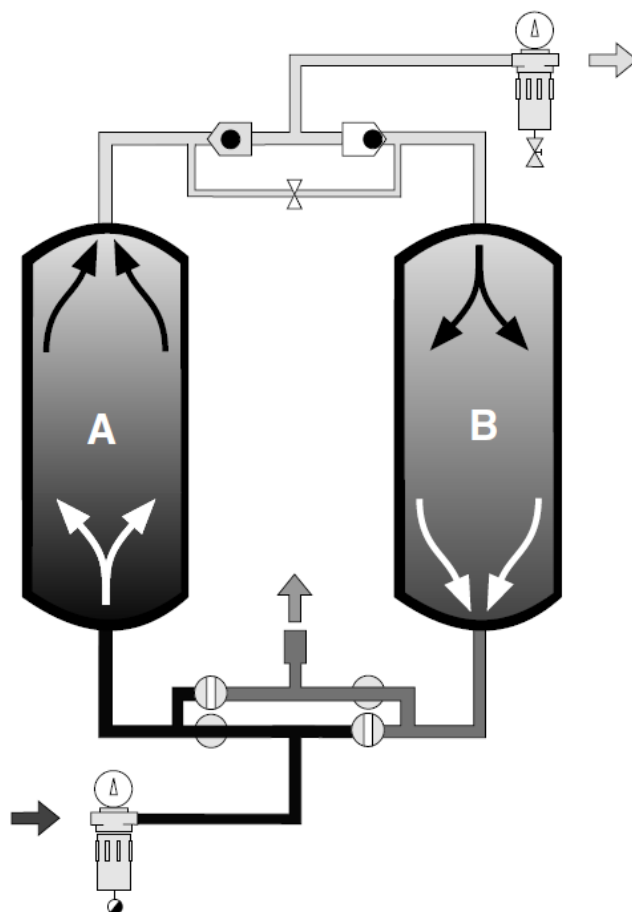
V případě, že je třeba dosáhnout tlakového rosného bodu pod 0°C, se nejčastěji využívá adsorpčního sušení. Stlačený vzduch je přiveden na pevný adsorbent a molekuly vody se pomocí adhezních sil naváží na jeho povrch. Proto musí být adsorbent vysoce porézní. Pro různé postupy regenerace se používají různé adsorbční činidla, nejčastěji aktivovaný oxid hlinitý (Al_2O_3 – Alumogel), silikagel (SiO_2) a molekulární síta ($\text{Na}_x(\text{AlO}_2)_y(\text{SiO}_2)_z$). V tabulce 2 jsou uvedeny některé vlastnosti těchto adsorpčních látek. *

Adsorpční látka	Dosažitelný tlakový rosný bod [°C]	Maximální teplota vysoušeného vzduchu [°C]	Regenerační teplota [°C]	Aktivní povrch [m^2/g]
Silikagel (SiO_2)-kousky	-50	+50	120 - 180	500 - 800
Silikagel (SiO_2) - kuličky	-50	+50	120 - 180	200 - 300
Aktivovaný oxid hlinitý (Al_2O_3)	-60	+40	175 - 315	230 - 380
Molekulární síto $\text{Na}_x(\text{AlO}_2)_y(\text{SiO}_2)_z$	-90	+140	200 - 350	750 - 800

Tabulka 2: Používaná adsorpční činidla (3)

**Vlastnosti adsorpčních činidel se mění v závislosti na teplotě a tlaku vysoušeného vzduchu*

Díky možnosti dosáhnout tlakový rosný bod až -90°C se používají adsorpční sušičky tam, kde jsou požadavky na stlačený vzduch s velmi nízkým obsahem vlhkosti, například v elektronickém, farmaceutickém, potravinářském a nápojovém průmyslu a kde venkovní teplota klesá pod bod mrazu.

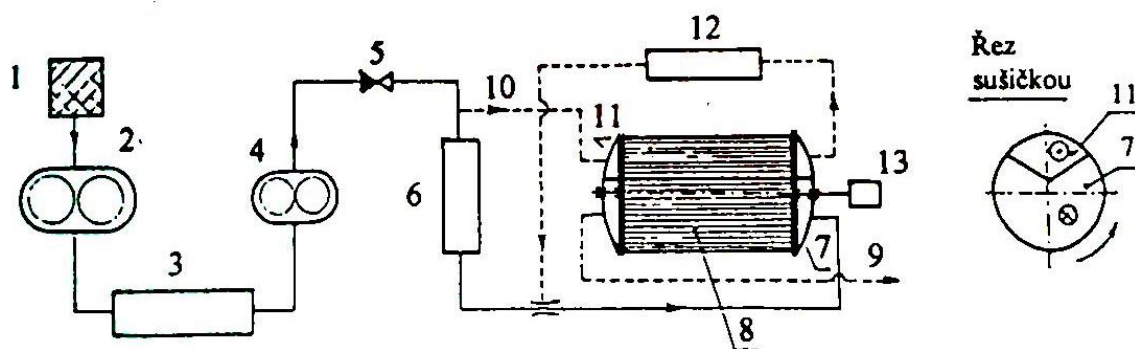


Obrázek 11: Adsorpční sušička (3)

Adsorpční sušička (schéma na obrázku 11) se skládá ze dvou nádob naplněných desikantem. Stlačený vzduch nejdříve prochází jednou nádobou, vodní pára se váže na desikant, dokud není nasycený. V tuto chvíli systém ventilů přepne proud vzduchu do druhé nádoby, zatímco v první nádobě se tlak sníží na atmosférický a náplň se regeneruje. Tak může sušička pracovat nepřetržitě.

K regeneraci se využívají dvě různé metody, buď za tepla nebo za studena. Při regeneraci za tepla se buď náplň vyhřívá přímo nebo se nádobou vede suchý horký vzduch. Při překročení regenerační teploty desikantu se snižuje jeho schopnost vázat vodu, zachycená vodní páry se uvolňuje a je odváděna regeneračním vzduchem ven z nádoby. Teplota vzduchu se volí podle druhu adsorbentu mezi 120 a 350°C, pracovní interval se pohybuje mezi 4 a 8 hodinami. Tato metoda se používá hlavně pro velké výkonnosti.

Druhá metoda (tzv. tlakovým šokem) funguje bez dalšího přívodu tepla, pracovní cyklus trvá 4 až 10 minut. Je potřeba malá část již vysušeného vzduchu (15 – 20%), který se nechá proudit v protisměru vysoušenou náplní a při poklesu tlaku se pohlcená vlhkost z adsorbentu vypuzuje do vysoušecího vzduchu. Kvůli ztrátě regeneračního vzduchu se tento způsob upřednostňuje pro menší zařízení a výkonnosti. (1)



Obrázek 12: Rotační bubnová sušička (1)

Možností, jak eliminovat ztrátu reaktivačního vzduchu je rotační bubnová sušička (na obrázku 12). Tato sušička spotřebovává energii jen k pohonu pomalu točícího se bubnu a dochlazovače. Dosažitelný tlakový rosný bod je až -40°C , vzduch musí být úplně bez oleje.

Po výstupu z dvoustupňového kompresoru z mezistupňovým chladičem je stlačený vzduch rozdělen do dvou proudů. Hlavní vstupuje do dochlazovače a následovně do větší oddělené části bubnu, který je celý vyplněn speciální tkaninovou vložkou impregnovanou silikagelem. Tam se stlačený vzduch vysuší a pokračuje do sítě.

Horký stlačený vzduch oddělený před dochlazovačem je přiváděn do menšího regeneračního průřezu bubnu, kde odstraní vlhkost desikantu. Pak pokračuje do regeneračního dochlazovače a připojuje se k hlavnímu proudu vzduchu k vysušení.

3.1.3 Absorpční sušení

Vysoušení vzduchu absorpcí je nepříliš často využívaný způsob vysoušení stlačeného vzduchu, při kterém hygroskopický vysoušecí prostředek pohlcuje vodní páru. Protože absorpční schopnost látek se s časem snižuje, je třeba desikant pravidelně měnit.

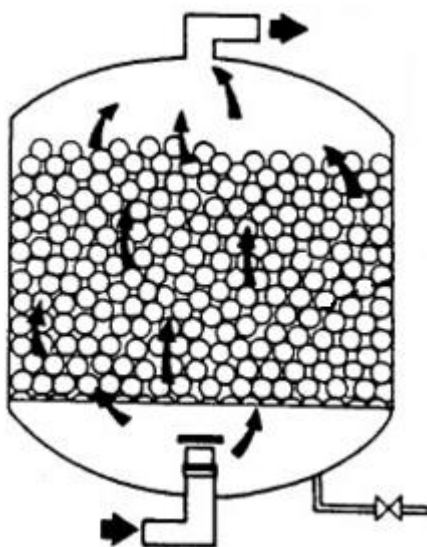
Vysoušecí prostředky jsou nejčastěji rozpustné a kapalné, jejich příklady jsou uvedeny v tabulce 3. Kapalné absorpční látky mohou dosáhnout tlakového rosného bodu až -26°C , u rozpustných je tlakový rosný bod nad 0°C . Absorpční vysoušecí látky jsou využitelné hlavně pro velké množství plynu o vysoké vlhkosti.

Vysoušecí prostředky	
Rozpustné	Kapalné
Chlorid lithný	Kyselina sírová
Chlorid vápenatý	Kyselina fosforečná
	Glycerol
	Trietylglykol

Tabulka 3: Absorpční vysoušecí prostředky (3)

U absorpčních sušiček stlačený vzduch vstupuje zdola přes síto nahoru ložem ze sušícího prostředku, který přitom pohlcuje část vodní páry. Rozpustný vysoušecí prostředek se stává za přítomnosti vody kapalným a protéká přes síto na dno nádoby, odkud je odváděn pryč výpustí ve dně. Množství desikantu tedy během sušení ubývá a je třeba ho doplňovat.

Absorpční způsob sušení se používá zřídka, například pro úpravu stlačeného vzduchu v laboratořích.



Obrázek 13: Absorpční sušička s rozpustným sušícím prostředkem (10)

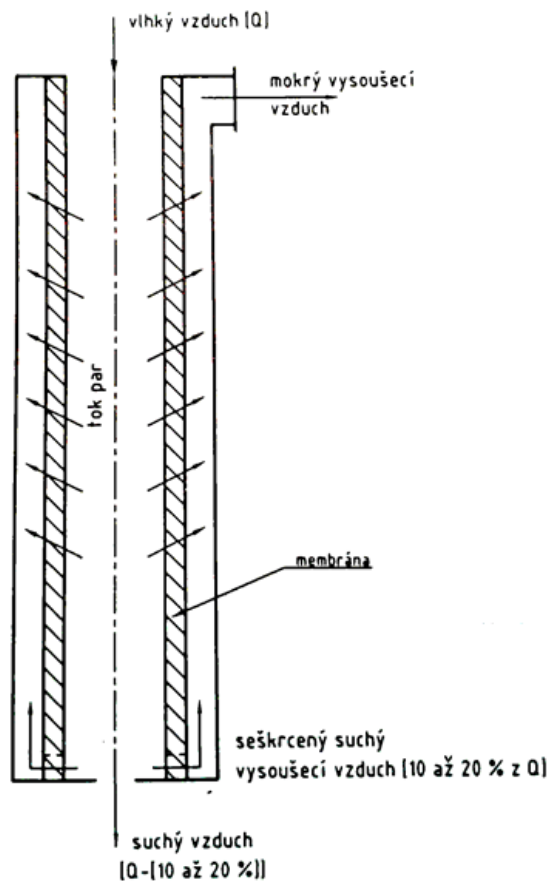
3.1.4 Difuzní sušení

Membránová sušička

Membránové sušičky jsou složeny ze svazku dutých vláken (membrán), jejichž vnitřkem shora dolů proudí vlhký stlačený vzduch. Při průchodu je vlhkost vytlačována přes membrány ven (ve směru gradientu parciálního tlaku vodní páry) a vzduch vystupuje z vlákna suchý.

Část vysušeného vzduchu (10 – 20 %) se nechá vyexpandovat a tento suchý výplachový vzduch proudí v protisměru mimo dutá vlákna a odvádí molekuly vlhkosti.

U membránových sušiček je možné dosáhnout tlakového rosného bodu až -20°C .



Obrázek 14: Membránová sušička (1)

3.2 Filtry

Účelem filtrů je odloučení pevných částic, oleje a vody ve formě kapek ze vzduchu tak, aby odpovídal požadovaným parametrům. Toho se docílí průchodem vzduchu filtračním prostředkem, v němž se nečistoty usazují. Před sání kompresoru se umísťuje sací filtr, který musí odfiltrovat větší pevné částice, aby nepoškodili kompresor. Před kondenzační sušičku a za dochlazovačem a vzdušníkem se umísťuje hrubý filtr, který má chránit sušičku hlavně před pevnými částicemi. Za ni je možné zařadit jemný filtr k odstranění zbylého kondenzátu.

Před adsorpční sušičku je nutné předřadit jemný filtr a až za ni filtr hrubý. Nesmí totiž dojít ke kontaminaci adsorbentu olejem. K odstranění plynných nečistot ze stlačeného vzduchu (hlavně olejových par) se využívá adsorpčních filtrů s aktivním uhlím. Filtry se musí pravidelně čistit nebo vyměňovat, aby se nesnížila jejich účinnost.

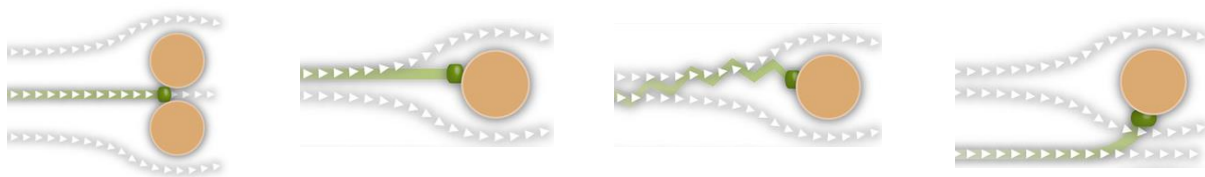
Uvnitř filtru dochází k odlučování nečistot těmito mechanismy:

Síťový efekt – Nejjednodušší způsob filtrace. Částice ($>10\mu\text{m}$) je větší než prostor mezi dvěma vlákny, proto dochází k zachycení.

Narážení - Relativně velká částic s vysokou hustotou ($> 5\mu\text{m}$) nestačí na rozdíl od proudu vzduchu změnit směr obtékání, narazí na vlákno a ulpí na něm.

Difúze – Brownův pohyb - Objevuje se zejména u velmi malých částic ($< 0,2\mu\text{m}$), které se od vzájemných nárazů jednotlivých molekul neuspořádaně pohybují, nezávisle na směru proudění. Tím se zvyšuje šance, že částice bude zachycena vláknem.

Zadržení – Vyskytuje se jen u syntetických filtrů. Částice ($> 0,1\mu\text{m}$) sleduje směr proudění, ale přesto je se zachytí na vlákně pomocí elektrostatických sil. (11)



Obrázek 15: Mechanismy filtrace: Síťový efekt, nárážení, difúze, zadržení (11)

3.2.1 Sací filtry

Vstupní filtry chrání kompresor před prachovými částicemi obsaženým v atmosférickém vzduchu. Nečistoty se usazují v kompresoru, zvyšují jeho opotřebení a netěsnost ventilů. Vstupní vzduch může být nasáván z venku nebo z místnosti, kde je kompresor instalován. Nasávaný vzduch by měl být co nejchladnější, aby byla účinnost kompresoru co nejvyšší.

Filtry se skládají z plastového krytu, ve kterém je umístěna vyměnitelná vložka. Vložky jsou buď suché nebo smáčené ve viskózním oleji.

Vložky suchých filtrů mohou být z papíru nebo z vláknitého rouna. Pro zvýšení filtrační plochy se vložky skládají a jsou vyztuženy drátěným pletivem. Suché filtry jsou nejúčinnější pro částice větší než $10\mu\text{m}$.

Filtry smáčené ve viskózním oleji tvoří kovová smáčená vložka, na níž se zachycují pevné částice, které nestačí zareagovat na změnu směru proudění. U těchto filtrů se musí především zabránit vyschnutí oleje. Hodí se pro větší koncentraci nečistot a větší částice ($>20\mu\text{m}$).

Dalším možností je filtr promývací, kde k zachycení částic slouží hladina oleje. Vzduch se nasává střední trubkou, narazí na hladinu oleje, kde se zachytí mechanické nečistoty a přes filtrační vložku z přírodních vláken proudí do stroje. Olej se musí pravidelně vyměňovat. Filtr má velkou kapacitu částic, která je rovna až hmotnosti oleje ve filtru. (1)

3.2.2 Filtry stlačeného vzduchu

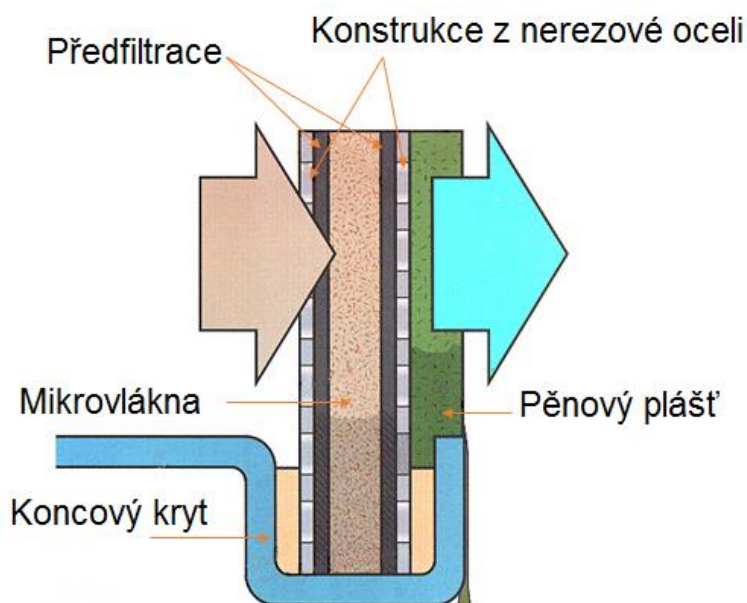
Podle požadavků na kvalitu stlačeného vzduchu se za vzdušník kompresoru zařazují různé druhy filtrů. Podle použití stlačeného vzduchu mohou tyto filtry odstranit kapičky vody, oleje a pevné a plynné nečistoty, které by mohly poškodit pneumatické zařízení.

Mikroporézní filtry s pravidelnými póry (Předfiltr, hrubý filtr)

Slouží k prvnímu odloučení pevných částic ze stlačeného vzduchu před sušičkou. Pomocí síťového efektu jsou tyto filtry schopné zachytit pevné částice od 3 μm , ale olej, vodu a jemné částice jen minimálně. Používané filtrační vložky jsou duté válce z porézních slinutých bronzů, keramiky, polyetylenu nebo polypropylenu.

Mikrofiltry s neuspořádanými mikrovlákný (Hrubý filtr)

V případě vyšších požadavků na stlačený vzduch se za kondenzační sušičku zařadí filtr z neuspořádaných mikrovláken, který dokáže snížit obsah oleje ve vzduchu až na 0,01 mg/m^3 a zachycuje pevné částice větší než 0,01 μm . Olejové částice naráží do skleněných mikrovláken a vytváří větší kapky, které jsou vedeny proudem vzduchu k vnějšímu okraji vložky do pěnového pláště. V něm olejové kapky vlastní gravitací spadnou na dno filtru.



Obrázek 16: Filtr stlačeného vzduchu s neuspořádanými mikrovlákný (12)

Filtry s aktivním uhlím

Po použití filtrů a sušičky zůstanou ve stlačeném vzduchu ještě olejové páry. K jejich odstranění se za mikrofiltr zařadí filtr s aktivním uhlím, který snižuje obsah oleje ve vzduchu až na 0,005 mg/m^3 . Filtr s porézním aktivním uhlím pracuje na principu adsorpce. Stlačený vzduch proudí přes náplň z aktivního uhlí a v něm obsažené uhlovodíky se na ni vážou

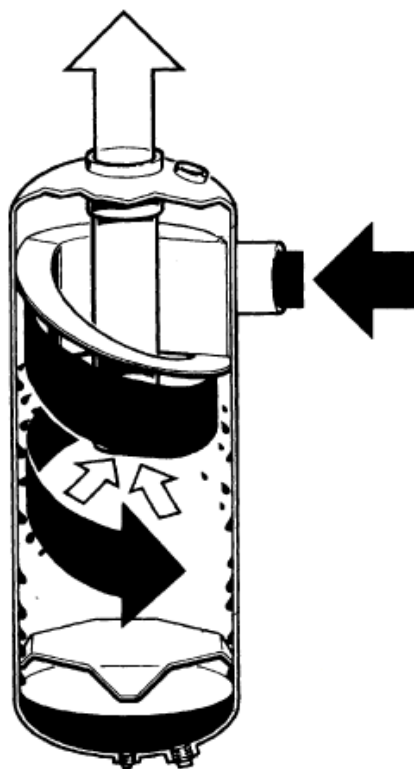
pomocí adhezních sil. Náplň z aktivního uhlí není možné regenerovat, je třeba ji pravidelně měnit.

Nejnižší koncentrace oleje ($0,001 \text{ mg/m}^3$) ve stlačeném vzduchu je možné dosáhnout katalytickou oxidací. Stlačený vzduch obsahující olej vstupuje do nádoby naplněné porézním katalytickým materiálem, který je zahřátý na teplotu 150°C . Olej a uhlovodíky ve stlačeném vzduchu, jsou na povrchu katalytického granulátu chemickou reakcí přeměněny na vodu a oxid uhličitý a z nádoby vystupuje čistý vzduch. (13)

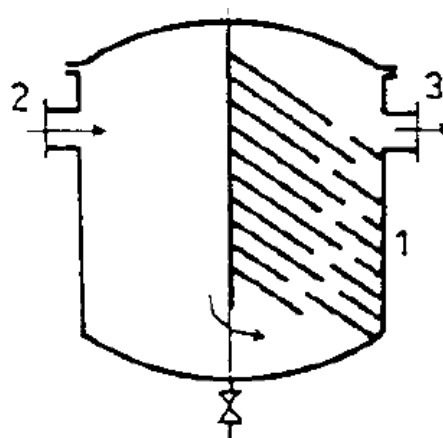
3.3 Odlučovače kondenzátu

Odlučovače mají za úkol oddělit ze stlačeného vzduchu větší množství vody ve formě kapek nebo oleje, případně jejich směs. Většinou se zařazují za dochlazovač v kombinaci s filtry stlačeného vzduchu

Nejrozšířenější druh odlučovače se nazývá cyklonový, jeho schéma je na obrázku 17. Do cyklonového odlučovače vstupuje stlačený vzduch sestupně po šroubovici. Pevné a kapalné částice se vlastní setrvačností oddělují od proudu vzduchu, jsou brzděny pláštěm nádoby a padají na vyboulený kotouč, přes který se dostávají na dno nádoby. Kotouč zabraňuje tomu, aby se oddělený kondenzát znovu smísil se vzduchem. Čistý vzduch vystupuje střední trubkou, vzniklý kondenzát se musí manuálně nebo automaticky odvést. (3)



Obrázek 17: Cyklonový odlučovač (3)



Obrázek 18: Odlučovač oleje (1)

Pro odloučení oleje u menších stabilních kompresorů se používá jednoduchý odlučovač (Obrázek 18). Vzduch vstupující do levé komory, část kondenzátu a oleje se zachytí nárazem do přepážky. Stlačený vzduch pokračuje do pravé poloviny, kde se v systému rovnoběžných lamel odlučují kapičky oleje. (1)

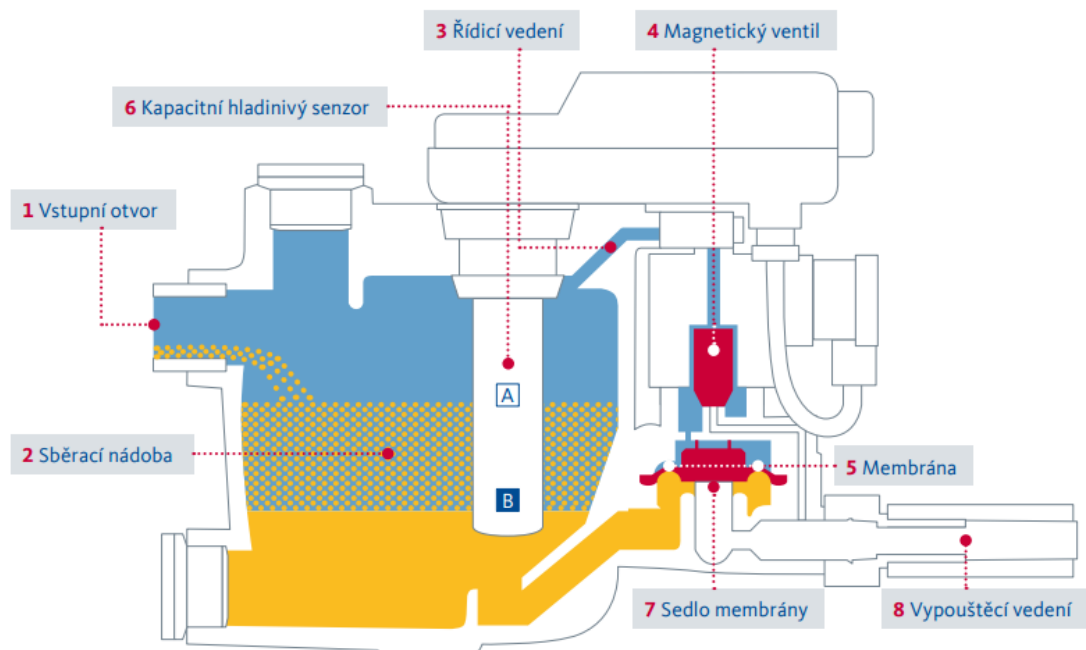
3.4 Odvaděče kondenzátu

Po odloučení kondenzátu ze stlačeného vzduchu je třeba jej ze systému účinně odvést. K tomu se používají manuální a automatické odvaděče kondenzátu.

Manuální odvádění pomocí ručního ventilu není příliš spolehlivé, proto byly vyvinuty automatické odvaděče, např. plovákový nebo odvaděč s elektronickým hlídáním hladiny kondenzátu.

Stavba plovákového odvaděče je podobná s manuálním sběračem kondenzátu. Kondenzát stéká do nádrže, ve které je umístěn plovák. Ten je nadzdvihován stoupající hladinou kondenzátu a při určité výšce otevře vypouštěcí ventil, přes který je kondenzát vytlačen stlačeným vzduchem do odpadového potrubí.

Výšku hladiny kondenzátu odvaděče s elektronickým hlídáním hladiny (Obrázek 19) kontroluje kapacitní hladinový snímač. Jakmile se nádoba naplní, otevře se magnetický ventil a prostor nad ventilovou membránou se odvzdušní. Membrána otevře výstupní vedení a přetlak do něj vytlačí kondenzát. Jakmile klesne hladina kondenzátu pod minimální bod, uzavře elektronika magnetický ventil a ventilová membrána se zavře. V případě poruchy je magnetický ventil otevírán v předem daném časovém intervalu a kondenzát je i nadále odváděn. (14)



Obrázek 19: Odvaděč kondenzátu s elektronickým hlídáním hladiny (7)

Kondenzát odloučený ze stlačeného vzduchu je třeba likvidovat nezávisle od toho, jestli pochází z mazaného nebo bezmazného kompresoru, použití čističky vody v závodě se nedoporučuje. K úpravě disperzního kondenzátu slouží oddělovací systém olej-voda, který funguje na základě rozdílných hustot jednotlivých složek.

4. Kompresorové stanice

Kompresorová stanice je soubor zařízení, které zajišťuje výrobu stlačeného vzduchu. Jejími základními parametry jsou výkonnost, provozní přetlak a požadovaná kvalita stlačeného vzduchu. Na základě těchto požadavků je nutné vybrat zařízení k docílení požadovaných parametrů. Kompresorová stanice se skládá ze základních zařízení: kompresory, motory, sušičky vzduchu, separátor olej-voda, filtry, dochlazovače, odlučovače, vzdušníky, potrubní rozvody atd.

4.1 Návrh kompresorové stanice

Je třeba navrhnout kompresorovou stanici pro pohon dvanácti stříkacích pistolí s tryskami o průměrech 1,5 mm výrobce GAV Italy. Spotřeba vzduchu jedné pistole je 0,2 m³/min při maximálním pracovním tlaku 0,8 MPa. Požadovaná třída kvality stlačeného vzduchu dle

ISO 85731 je pro pevné částice a koncentraci oleje 1 a pro vlhkost třída 4. To znamená, že pro pevné částice je maximální povolená koncentrace $0,1 \text{ mg/m}^3$ a největší částice může být velká $0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Maximální tlakový rosný bod je $+3^\circ\text{C}$ a koncentrace oleje nesmí přesáhnout $0,01 \text{ mg/m}^3$.

4.2 Volba kompresoru

Při výpočtu celkové výkonnosti kompresoru se zavádí několik korekčních součinitelů. Pro stroje, které nepracují nepřetržitě, se využívá součinitel využití v pracovní hodině, pro stříkací pistole se doporučuje $k_v = 0,8$. Součinitel současnosti udává procento současně pracujících spotřebičů. Pro kusovou výrobu je v literatuře uváděno $k_s = 0,7$. Součinitel opotřebení bere ohled na zvýšení spotřeby vzduchu vlivem opotřebení strojů, pro ruční stroje volím $k_t = 1,1$. Dále musím brát v úvahu ztráty a netěsnosti v rozvodné síti, k čemuž slouží součinitel ztrát k_z , volím $k_z = 1,3$. (1)

Výsledná požadovaná výkonnost kompresoru pro pohon 12 stříkacích pistolí při spotřebě vzduchu jedné pistole $Q_0 = 0,2 \text{ m}^3/\text{min}$ je:

$$Q = k_v * k_s * k_t * k_z * 12 * Q_0 * 60 = 0,8 * 0,7 * 1,1 * 1,3 * 12 * 0,2 * 60 = 115,3 \text{ m}^3/\text{h} = 1,92 \text{ m}^3/\text{min} \quad (20^\circ\text{C}, \text{pracovní tlak vzduchu } 0,8 \text{ MPa}) \quad (5)$$

Vzhledem k požadované výkonnosti volím šroubový kompresor Atmos s elektromotorem Albert E. 150 Premium (Obrázek 20):

Výkon motoru: 15 kW

Maximální přetlak: 1MPa

Jmenovitá výkonnost: $2,36 \text{ m}^3/\text{min} = 141,6 \text{ m}^3/\text{h}$
při pracovním tlaku vzduchu 1 MPa

Objem vzdušníku: 500 l



Obrázek 20: Šroubový kompresor Atmos

4.3 Zařízení pro filtraci, sušení, odvod a separaci kondenzátu

Pro dosažení požadovaných parametrů stlačeného vzduchu je třeba použít různé druhy filtrů, sušičku, odvaděč vzniklého kondenzátu a separátor olej-voda. Přímo za kompresorem je umístěn vzdušník, který má funkci zásobníku stlačeného vzduchu a zde může slou-

žit i jako dochlazovač. Následovat bude cyklonový odlučovač, filtr, kondenzační sušička a jemný filtr.

Cyklonový odlučovač BOGE Z 20N

Pro výkonnost kompresoru 2,36 m³/min volím cyklonový odlučovač Boge Z 20N (Příloha 1):

Výkonnost: 2,8 m³/min při pracovním tlaku vzduchu 1 MPa

Nejvyšší pracovní tlak: 1,6 MPa

Velikost pevných částic: > 50 μm

Maximální tlaková ztráta: 5 kPa (15) - viz pdf Druckluft Kompendium, str. 95 na CD

Hrubý filtr Hankison F06-B-SF

Objemový průtok filtrů nabízených výrobcem Hankison je udáván při pracovním tlaku vzduchu 0,7 MPa. Pro pracovní tlak 1 MPa je nutné provést přepočítání průtoku na pracovní tlak 0,7 MPa a zařízení zvolit podle přepočtené výkonnosti. Podle katalogu výrobce se pro přetlak vzduchu 1 MPa použije korekční součinitel $f_{f1MPa} = 1,38$ (Příloha 2)

$$Q_{0,7MPa} = Q_k / f_{f1MPa} = 141,6 / 1,38 = 102,6 \text{ m}^3/h \quad (6)$$

Pro požadovanou výkonnost volím filtr Hankison F07-B-SF (Příloha 3):

Výkonnost: 131 m³/h při pracovním tlaku vzduchu 0,7 MPa

180,8 m³/h při pracovním tlaku vzduchu 1 MPa

Pevné částice: Třída 3 (>5 μm)

Obsah oleje: Třída 5 (25 mg/m³)

Maximální pracovní tlak: 1,6 MPa

Tlaková ztráta: 7 kPa (16) – viz pdf Filtry Hankison na CD

Kondenzační sušička Hankison HHD 140

Objemový provozní průtok sušiček nabízených výrobcem Hankison je udáván při provozním tlaku vzduchu 0,7 MPa. Pro provozní tlak 1 MPa je podle katalogu výrobce nutné použít korekční součinitel $f_{f1MPa} = 1,1$ (Příloha 4). Teplotu vstupního vzduchu uvažujeme +35°C, teplotu prostředí +25°C.

$$Q_f = Q_k / f_{s1MPa} = 141,6 / 1,1 = 128,7 \text{ m}^3/h \quad (7)$$

Pro požadovanou výkonnost volím sušičku Hankison F07-B-SF (Příloha 4):

Výkonnost: 140 m³/h při pracovním tlaku vzduchu 0,7 MPa a teplotě vstupního vzduchu +35°C

154 m³/h při pracovním tlaku vzduchu 1MPa a teplotě vstupního vzduchu +35°C

Tlakový rosný bod: +3°C

Rozsah pracovních tlaků: 0,2 – 1,6 MPa

Příkon: 0,58 kW

Maximální tlaková ztráta: 25 kPa (17) - viz pdf Sušička Hankison na CD

Jemný filtr Hankison F06-B-HF

Pro jemný filtr platí stejný přepočít pro tlak vzduchu 1 MPa jako u hrubého filtru. Požadovaná výkonnost jemného filtru je tedy shodná $Q_f = 128,7 \text{ m}^3/\text{h}$ jako u hrubého filtru. Z katalogu výrobce Hankison volím filtr F06-B-HF (Příloha 5):

Výkonnost: $131 \text{ m}^3/\text{h}$ při pracovním tlaku vzduchu 0,7 MPa
 $180,8 \text{ m}^3/\text{h}$ při pracovním tlaku vzduchu 1 MPa

Pevné částice: Třída 1 (> 0,1 μm)

Obsah oleje: Třída 1 (0,01 mg/m^3)

Maximální pracovní tlak: 1,6 MPa

Maximální tlaková ztráta: 12 kPa (16) - viz pdf Filtry Hankison na CD

Odvaděč kondenzátu Bekomat 20

Pro výkonnost kompresoru $2,36 \text{ m}^3/\text{min}$, výkonnost sušičky $2,3 \text{ m}^3/\text{min}$ a výkonnost dvou filtrů $4,36 \text{ m}^3/\text{min}$ volím odvaděč kondenzátu s elektronickým řízením výšky hladiny Bekomat 20 (Příloha 6):

Maximální výkon kompresoru: $4 \text{ m}^3/\text{min}$ (pro oblast střední Evropy)

Maximální výkon sušičky: $8 \text{ m}^3/\text{min}$

Maximální výkon filtru: $40 \text{ m}^3/\text{min}$

Provozní tlaky: 0,08 - 1,6 MPa (18)

Separátor olej-voda Öwamat 10

Pro výkon šroubového kompresoru $2,36 \text{ m}^3/\text{min}$ a typ oleje VDL volím separátor olej-voda Öwamat 10 (Příloha 7):

Výkon šroubového kompresoru: $2,4 \text{ m}^3/\text{min}$

Objem nádoby: 10 l (19)

4.4 Návrh průměru potrubí

Maximální rychlost proudění u rozvodů v závodech se doporučuje do $w = 15 \text{ m/s}$ (1). Odhad délky potrubí je 50 m.

$$w = \frac{Q_p}{S} = \frac{4Q_p}{\pi d_{min}^2} \rightarrow d_{min} = \sqrt{\frac{4Q_p}{\pi w}} = \sqrt{4 * \frac{2,36}{60 * \pi * 15}} = 0,057 \text{ m} = 57 \text{ mm} \quad (8)$$

d_{min} (m) – Minimální průměr potrubí

w (m/s) – Rychlost proudění

Q_p (m^3/s) – Objemový průtok stlačeného plynu

Volím jmenovitou světlost potrubí DN 65, vnitřní průměr potrubí $d = 0,0696 \text{ m}$.

Dále je nutné stanovit tlakovou ztrátu v potrubí. Nejprve určíme Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q_p \cdot d \cdot \rho}{\pi \cdot d^2 \cdot \eta} = \frac{4 Q_p \cdot p}{\pi \cdot d \cdot \eta \cdot r \cdot T} = \frac{4^{\frac{2,36}{60}} \cdot 1,1 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,0696 \cdot 18,24 \cdot 10^{-6} \cdot 287,1 \cdot 293,15} = 515\,592 \quad (9)$$

$Re > 2\,300$, jedná se tedy o turbulentní proudění. Součinitel tření stanovíme z Herrmannova vztahu pro hydraulicky hladké potrubí, který platí pro $Re < 1,5 \cdot 10^6$ (1):

$$\lambda = 0,0054 + 0,396 Re^{-0,3} = 0,0054 + 0,396 \cdot (515\,592)^{-0,3} = 0,013 \quad (10)$$

Po dosazení součinitele tření a výrazů pro hustotu stlačeného vzduchu $\rho = \frac{p}{rT}$ a rychlost proudění $w = \frac{4Q_p}{\pi d^2}$ do Weisbachova vzorce získáme následující vztah pro tlakovou ztrátu v potrubí:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \rho = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \left(\frac{4Q_p}{\pi d^2}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{p}{r \cdot T} = \lambda \frac{8 \cdot L \cdot Q_p^2 \cdot p}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot r \cdot T} = 0,013 \frac{8 \cdot 50 \cdot \left(\frac{2,36}{60}\right)^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{\pi^2 \cdot 0,0696^5 \cdot 287,1 \cdot 293,15} = 6\,523 \text{ Pa} \quad (11)$$

$\Delta p \text{ (Pa)}$	– Tlaková ztráta
$p \text{ (Pa)}$	– Absolutní tlak vzduchu na začátku potrubí
$Re \text{ (-)}$	– Reynoldsovo číslo
$w \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	– Rychlost proudění
$d \text{ (m)}$	– Vnitřní průměr potrubí
$\nu \text{ (m}^2\text{.s}^{-1}\text{)}$	– Kinematická viskozita
$\eta \text{ (Pa.s)}$	– Dynamická viskozita, pro vzduch o teplotě 20°C a absolutním tlaku 0,1.10 ⁶ MPa: $\eta=18,24 \cdot 10^{-6}$ Pa.s. (20) Předpokládáme, že hodnota dynamické viskozity vzduchu se až do tlaku 1 MPa téměř nezmění. (1)
$Q_p \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}$	– Objemový průtok stlačeného vzduchu při dané teplotě a tlaku
$\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	– Hustota vzduchu při daném tlaku a teplotě
$r \text{ (J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	– Měrná plynová konstanta, pro vzduch $r = 287,1 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (1)
$T \text{ (K)}$	– Teplota stlačeného vzduchu
$\lambda \text{ (-)}$	– Součinitel tření
$L \text{ (m)}$	– Délka potrubí

4.5 Tlaková ztráta

Tabulka 4 sumarizuje tlakové ztráty jednotlivých zařízení kompresorové stanice s výslednou tlakovou ztrátou.

Zařízení	Tlaková ztráta [kPa]
Vzdušník	10 (12)
Cyklonový odlučovač	5
Hrubý filtr	7
Kondenzační sušička	25
Jemný filtr	12
Potrubí	6,523
Celkem	65, 523 kPa

Tabulka 4: Tlaková ztráta zařízení kompresorové stanice

Velikost tlakových ztrát by se u malých sítí měla pohybovat do 7%. Při výstupním tlaku z kompresoru 1 MPa vychází povolená tlaková ztráta 70 kPa, čemuž vypočtená tlaková ztráta 65,523 kPa vyhovuje.

5. Závěr

Cílem práce bylo popsat problematiku výroby a úpravy stlačeného vzduchu a jeho využití v průmyslu. Úvod práce je věnován využití stlačeného vzduchu, jako například ve stavebnictví, těžebním, potravinářském a chemickém průmyslu, energetice nebo zdravotnictví.

Další kapitola se zabývá možnostmi výroby stlačeného vzduchu. Kompresory, zařízení na výrobu stlačeného vzduchu, je možné pro různé výkonnosti a výtlačné přetlaky volit z široké nabídky dostupných konstrukčních řešení. Kompresory se dělí na objemové a rychlostní. U objemových kompresorů se stlačení plynu dosáhne zmenšováním pracovního prostoru, rychlostní kompresory pracují na principu přeměny kinetické energie v tlakovou.

Další kapitola se věnuje možnostem úpravy stlačeného vzduchu a používaným komponentám. Pneumatické zařízení se nesmí poškodit zkondenzovanou vlhkostí, usazenými prachovými částicemi, ani mazným olejem, a proto se zařazují další zařízení za výtlač kompresoru. Patří mezi ně odlučovače kondenzátu, filtry, sušičky, odvaděče kondenzátu a separátory.

Poslední část práce obsahuje návrh kompresorové stanice. Pro pohon stříkacích pistolí stlačeným vzduchem byla vypočtena požadovaná výkonnost kompresoru a byl vybrán vyhovující kompresor společnosti Atmos. Pro dosažení doporučených tříd kvality pevných částic, oleje a vlhkosti je do kompresorové stanice zařazen cyklonový odlučovač, hrubý filtr, k odstranění vody ve formě vodní páry kondenzační sušička Hankison a ke snížení obsahu oleje a pevných nečistot jemný filtr. Kondenzát je odváděn elektronickým odvaděčem. Na závěr byla vypočtena celková tlaková ztráta kompresorové stanice a porovnána s doporučenými hodnotami.

Přílohy

Příloha 1 – Cyklonové odlučovače BOGE

BOGE Typ	Höchstdruck		Effektive Liefermenge 50 Hz		Maße B × H × T mm	Gewicht kg
	bar	psig	m ³ /min	cfm/min		
Z 20N	8	116	2.26	77.7	103 x 85 x 234	1.6
Z 20N	10	145	2.8	98.8	103 x 85 x 234	1.6
Z 20N	13	189	3.5	123.6	103 x 85 x 234	1.6

Příloha 2 – Korekční součinitele pro filtry stlačeného vzduchu Hankison

Korekční součinitele

Provozní tlak – bar [přetl.]	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
Faktor	0,38	0,52	0,63	0,75	0,88	1,00	1,13	1,38	1,65	1,87	2,13

Příloha 3 – Filtry stlačeného vzduchu Hankison řady SF/HF 9

Model	Katalogové číslo	Výkonnost [m ³ /h*]	Max. pracovní tlak [bar g]	Hmotnost [kg]	Rozměry (v × š)				Potrubní připojení [R]	Filtrační prvek	Katalogové číslo	Počet filtračních prvků	X-DRAIN
					A	B	C	D					
F02-B-SF	60006902	35	16,0	0,8	113,6	205,5	171,4	102,0	¼ "	SF-02	79006902	1	▲ SXD-1
F03-B-SF	60006903	61	16,0	0,8	113,6	205,5	171,4	102,0	3/8 "	SF-03	79006903	1	▲ SXD-1
F04-B-SF	60006904	88	16,0	0,9	113,6	205,5	216,4	102,0	½ "	SF-04	79006904	1	▲ SXD-1
F06-B-SF	60006906	131	16,0	1,4	132,0	262,1	219,8	127,0	¾ "	SF-06	79006906	1	▲ SXD-1
F07-B-SF	60006907	180	16,0	1,4	132,0	262,1	219,8	127,0	¾ "	SF-07	79006907	1	▲ SXD-1
F08-B-SF	60006908	275	16,0	1,6	132,0	326,1	283,8	127,0	1 "	SF-08	79006908	1	▲ SXD-1
F10-B-SF	60006910	450	16,0	3,8	200,0	336,7	276,1	178,0	1 ½ "	SF-10	79006910	1	▲ SXD-1

Příloha 4 – Kondenzační sušičky Hankison řady HHD a jejich korekční součinitele

Model	Výkonnost* m ³ /h	Potrubní připojení	Rozměry			Hmotnost kg	El. připojení V/Ph/Hz	Příkon kW
			A	B	C			
HHD 21	20	R 3/8"	344	320	390	15	230/1/50	0,24
HHD 31	30					19		
HHD 61	60					29		
HHD 81	80	R 3/4"	368	419	575	29	230/1/60	0,42
HHD 101	100					41		
HHD 140	140	R 1"	393	591	601	50	230/1/50	0,58
HHD 160	160					53		0,60
HHD 240	240					58		0,87
HHD 315	315					72		1,10
HHD 360	360					78		1,30
HHD 470	470					86		1,48
HHD 580	580					100		1,90
HHD 680	680					112		2,45
HHD 820	820					134		2,55
HHD 1000	1.000					1.361		2,70
HHD 1100	1.100	R 2 1/2"	1.129	857	1.510	314	400/3/50	2,55
HHD 1300	1.300					327		2,95
HHD 1700	1.700					1.131		5,70
HHDS 1100	1.100	R 2 1/2"	1.129	857	1.510	266	400/3/50	2,05
HHDS 1300	1.300					285		2,90
HHDS 1700	1.700					1.131		3,30

*Dle DIN/ISO 7183, založeno na výkonnosti definované při teplotě +20 °C, tlaku 1 bar (a), pracovním tlaku 7 bar (g), vstupní teplotě +35 °C, venkovní teplotě nebo teplotě chladicí vody +25 °C, teplotě rosného bodu +3 °C | Technické údaje a data se mohou změnit bez předchozího upozornění.

Provozní podmínky*		Min.	Nom.	Max.
Pracovní tlak		2 bar (g)	7 bar (g)	16 bar (g)
Vstupní teplota		+4 °C	+35 °C	+49 °C
Teplota prostředí	HHD 21 - 101	+4,4 °C	+25 °C	+43 °C
	HHD 140 - 1000	+7 °C		
	HHD/HHDS 1100 - 1700	+3 °C		

*V případě jiných provozních podmínek je třeba při výběru správné jednotky použít následující opravné součinitele.

Kondenzační sušičky stlačeného vzduchu Hankison® pracují nejlépe v kombinaci s předfiltry SF a jemnými filtry HF Hankison®.

Opravné součinitele pro různé hodnoty pracovního tlaku v bar (g) (F ₁)															
bar (g)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HHD 21 - 101	-	0,84	0,90	0,93	0,97	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11
HHD 140 - 1000						1,00									1,24
HHD/HHDS 1100 - 1700	0,68	0,79	0,87	0,92	0,96	1,00	1,03	1,07	1,10	1,13	1,16	1,18	1,21	1,22	1,27

Opravné součinitele pro různé hodnoty vstupní teploty v °C (F ₂)					
°C	+35	+40	+45	+49	
HHD 21 - 101	1,00	0,86	0,75	0,63	
HHD 140 - 1000	1,00				
HHD/HHDS 1100 - 1700	1,00	0,85	0,71	0,63	

Opravné součinitele pro různé hodnoty teploty prostředí v °C (F ₃)					
°C	+25	+30	+35	+40	+45
HHD 21 - 101	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
HHD 140 - 1000	1,00	0,92	0,85	0,80	
HHD/HHDS 1100 - 1700	1,00	0,94	0,89	0,83	0,78

Vybraný příklad		Výpočet
Výkonnost kompresoru (V ₁)	520 m ³ /h	$V_2 = \frac{V_1}{F_1 \cdot F_2 \cdot F_3} = \frac{520}{1,1 \cdot 0,71 \cdot 0,92} = 756 \text{ m}^3/\text{h}$
Pracovní tlak (F ₁)	10 bar (g)	
Vstupní teplota (F ₂)	+45 °C	
Teplota prostředí (F ₃)	+30 °C	
V ₂	Požadovaná výkonost sušičky	

Řešení: HHD 820

Příloha 5 - Filtry stlačeného vzduchu Hankison řady HF/HF 5

Model	Katalogové číslo	Výkonnost [m ³ /h*]	Max. pracovní tlak [bar g]	Hmotnost [kg]	Rozměry (v × š)				Potrubní připojení [R]	Filtrační prvek	Katalogové číslo	Počet filtračních prvků	X-DRAIN
					A	B	C	D					
F02-B-HF	60006502	35	16,0	0,8	113,6	205,5	171,4	102,0	¼"	HF-02	79006502	1	▲ SXD-1
F03-B-HF	60006503	61	16,0	0,8	113,6	205,5	171,4	102,0	3/8"	HF-03	79006503	1	▲ SXD-1
F04-B-HF	60006504	88	16,0	0,9	113,6	205,5	216,4	102,0	½"	HF-04	79006504	1	▲ SXD-1
F06-B-HF	60006506	131	16,0	1,4	132,0	262,1	219,8	127,0	¾"	HF-06	79006506	1	▲ SXD-1
F07-B-HF	60006507	180	16,0	1,4	132,0	262,1	219,8	127,0	¾"	HF-07	79006507	1	▲ SXD-1

Příloha 6 – Odvaděče kondenzátu Beko

Modrá barva odpovídá oblasti Střední Evropy.

Model	20	20 FM*	12	12 CO	12 CO PN 63
Max. výkon kompresoru (m ³ /min)	5	(5)	8	8	8
	4	(4)	6,5	6,5	6,5
	2,5	(2,5)	4	4	4
Max. výkon sušičky (m ³ /min)	10	(10)	16	16	16
	8	(8)	13	13	13
	5	(5)	8	8	8
Max. výkon filtru (m ² /min)	50	50	80	80	80
	40	40	65	65	65
	25	25	40	40	40

Příloha 7 – Separátor olej- voda Öwamat

Modrá barva odpovídá oblasti Střední Evropy.

	Výkon kompresoru (m ³ /min)					
	Šroubový kompresor				Pístový kompresor 1- nebo 2-stupňový	
	turbínový olej LTD	olej VDL	olej VCL	syntetický olej	olej VDL	syntetický olej PAO*
ÖWAMAT® 10	2,8	2,8	2,1	2,1	1,9	1,6
	2,4	2,4	1,9	1,9	1,7	1,4
	2,1	2,1	1,6	1,6	1,5	1,2
ÖWAMAT® 11	5,5	5,5	4,2	4,2	3,8	3,2
	4,9	4,9	3,8	3,8	3,4	2,8
	4,2	4,2	3,2	3,2	2,9	2,4

Citovaná literatura

1. Liška, Antonín. *Technika stlačeného vzduchu*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999.
2. ČSN 10 5010. *Názvosloví kompresorů*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1986.
3. Hütter, Jürgen. *Druckluft Kompendium*. Darmstadt : Druckhaus Darmstadt GmbH, 2004.
4. Kolarčík, Kamil. *Kompresory*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012.
5. Wirsum, Manfred. *Energiewandlungstechnik [Přednáška]*. Aachen : Institut für kraftswerktechnik, Dampf- und Gasturbinen, 2015.
6. Allgemeines über Strahlpumpen. [Online] Bickel & Wolf, 2013. [Citace: 24. 3. 2016.] Dostupné z: www.bickel-wolf.com/files/lieferanten/GEA%20Wiegand/dokumente/Strahlpumpen_09.pdf.
7. Membránové sušičky stlačeného vzduchu. [Online] Beko Technologies, 2006. [Citace: 2. 5. 2016.] Dostupné z: http://www.beko-technologies.cz/fileadmin/downloads/brochures/drypoint_m/dry_m_cs_0706.pdf.
8. Jak pracuje kondenzační, adsorpční a membránová sušička. *Technika stlačeného vzduchu*. [Online] [Citace: 1. 4. 2016.] Dostupné z: <http://www.dls.cz/web/susicky/jak-pracuje-susicka/>.
9. Barber, Antony. *Pneumatic Handbook*. Oxford : Elsevier Science Ltd., 1997.
10. Frankel, Michael. *Compressed Air Piping Systems*. [Online] Offenbar Energy Inc., 2013. [Citace: 1. 5. 2016.] Dostupné z: <http://www.offenbar-energy.com/pdf/Compressed%20Air%20Piping%20Systems.pdf>.
11. Air Filter Guide. [Online] Mann + Hummel, 3. 5. 2016. [Citace: 3. 5. 2016.] Dostupné z: <http://www.vokesair.com/air-filter-guide/theory>.
12. *Stlačený vzduch*. Chrást u Plzně : Atmos Chrást s.r.o., 2016. Výuková prezentace.
13. Bekokat. [Online] Beko Technologies, 2015. [Citace: 1. 6. 2016.] Dostupné z: http://www.beko-technologies.cz/fileadmin/downloads/brochures/bekokat/bekokat_de_2015_08.pdf.
14. Procházka, Jaromír. *Péče o stlačený vzduch - odvádění kodenzátu*. *Autoexpert*. Listopad, 2007, ISSN 1211-2380.
15. Zyklonabscheider. [Online] Druckluftsysteme Boge, 2016. [Citace: 18. 5. 2016.] Dostupné z: <http://www.boge.com/de/produkte/zyklonabscheider>.

16. Filtrace stlačeného vzduchu. [Online] Hankison, 2010. [Citace: 18. 5. 2016.] Dostupné z:
http://www.hankison.cz/images/stories/web/filtry_pro_stlaceny/nova_generace_filtru_CZ2011.pdf.
17. Kondenzační sušičky. [Online] Hankison, 18. 5. 2016. [Citace: 18. 5. 2016.] Dostupné z:
http://www.hankison.cz/images/stories/web/kondenzacni_susicky/DS-01-HHD-HHDS-cz-Mondo.pdf.
18. Bekomat. [Online] Beko Technologies, 2011. [Citace: 19. 5. 2016.] Dostupné z:
http://www.beko-technologies.cz/fileadmin/downloads/brochures/bekomat//bekomat_cs_2011_03.pdf.
19. Öwamat 10-16. [Online] Beko Technologies, 19. 5. 2016. [Citace: 19. 5. 2016.] Dostupné z: <http://www.beko-technologies.cz/vyrobky/uprava-kondenzatu/oewamat/technicke-udaje/>.
20. Škorpík, Jiří. Viskozita suchého vzduchu. *Transformační technologie*. [Online] 2016. [Citace: 2. 6. 2016.] Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/909-1028.pdf>.