



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

REGENERACE TEPLA A VODY Z PROUDU ODPADNÍHO VZDUCHU

REGENERATION OF HEAT AND WATER FROM THE EXHAUST AIR STREAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Jankůj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Tomáš Jankůj
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Regenerace tepla a vody z proudu odpadního vzduchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na posouzení možností a návrh řešení regenerace tepla a vody z proudu odpadního sušícího vzduchu opouštějícího sušárnu dřeva. V rámci práce bude hodnocen vliv provozních parametrů na účinnost regenerace s ohledem na požadavky sušící technologie.

Cíle diplomové práce:

1. Popsat teplotní požadavky a energetickou náročnost pro konkrétní případy sušení dřevní hmoty a konkretizovat potenciál pro regeneraci tepla a vody.
2. Realizovat projekční návrh sestavy regeneračního výměníku s kondenzací vodních par a separací kondenzátu.
3. Vytvořit technickou dokumentaci uvedené regenerační jednotky.

Seznam doporučené literatury:

DVORSKÝ, E. a HEJTMÁNKOVÁ, P. , Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

KUPPAN, T., Heat exchanger design handbook. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

JANKŮJ, Tomáš. *Regenerace tepla a vody z proudu odpadního vzduchu*

Práce se zabývá procesem sušení dřeva. Jedná se o metodu odstraňování přebytečné vody z dřevní hmoty. Sušení lze rozdělit na dva základní typy. Prvním typem je přirozené sušení, při kterém dochází k sušení materiálu bez přítomnosti cizího zdroje energie. U tohoto typu záleží pouze na klimatických podmínkách a na množství dopadajícího slunečního záření. Dalším typem je sušení umělé, zde je již přítomen cizí zdroj energie, například kotel na biomasu. Proces sušení je v případě druhého typu výrazně rychlejší oproti prvnímu. Druhý typ sušení probíhá v zařízení zvaném sušárna. Existuje jich velké množství, nepoužívanější jsou komorová, pásová a bubnová. V nich se předává tepelná energie sušenému materiálu pomocí proudícího teplého sušícího média (konvekce). Teplo se sušícímu médiu předává v tepelném výměníku. Jelikož je sušící proces velmi energeticky náročný, je vhodné snížit potřebnou energii. To lze pomocí regenerace tepla a vody. V tepelném výměníku lze získat část tepla z proudícího odpadního média. Pokud dojde ve výměníku ke kondenzaci odpařené vody, uvolní se i skupenské teplo vody. Získané teplo se využije na předehřev sušícího média a tím se sníží potřebná energie.

Klíčová slova: sušárna, sušící médium, tepelná energie, tepelný výměník

ABSTRACT

JANKŮJ, Tomáš. *Regeneration of heat and water from the exhaust air stream*

This thesis deals with the process of wood drying. It is a method of removing excess water from wood. Drying can be divided into two basic types. The first type is natural drying. The material is dried without the presence of foreign energy source. This type depends only on climatic conditions and the amount of sunlight. Another type is artificial drying, where is present a foreign energy source, such as a biomass boiler. The second type is significantly faster than the first. The second type of drying uses a device called a wood dryer. There are a lot of types of wood dryers, the most widely used are kiln dryer, belt dryer, rotary drum dryer. In these devices, the thermal energy is transferred to the drying materials by the flowing warm drying medium (convection). The heat is transferred to the drying medium in a heat exchanger. Because the drying process is very energy demanding, it is appropriate to reduced the required energy. This can be done by regenerating heat and water. In the heat exchanger, part of the heat can be gained from the flowing exhaust medium. If a condensation of evaporated water in the exchanger occurs, the latent heat of the water is released. The gained heat is used to preheat the drying medium and thereby to reduce the required energy.

Keywords: wood dryer, drying medium, thermal energy, heat exchanger

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANKŮJ, Tomáš. *Regenerace tepla a vody z proudu odpadního vzduchu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117328>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci na téma *Regenerace tepla a vody z proudu odpadního vzduchu* jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 23.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále děkuji své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod	11
1 Proces sušení	12
1.1 Voda uložená ve dřevě	13
1.2 Přirozené sušení dřeva.....	13
1.3 Umělé sušení dřeva	14
2 Sušící médium	15
2.1 Vlhký vzduch	15
2.2 Spaliny.....	17
3 Druhy sušáren	18
3.1 Komorová sušárna.....	18
3.2 Pásová sušárna	19
3.3 Bubnová sušárna	20
3.4 Fluidní sušárna	22
3.5 Mikrovlnná sušárna	23
3.6 Shrnutí sušáren	24
4 Zdroje tepelné energie	25
4.1 Kotel.....	26
4.1.1 Roštový kotel.....	26
4.1.2 Kombinovaný velkoprostorový kotel.....	28
4.2 Kogenerační jednotky	29
4.2.1 Pístové spalovací motory	30
4.2.2 Mikroturbína.....	32
4.2.3 Stirlingův motor	33
4.2.4 Pístový parní stroj.....	34
4.3 Tepelná čerpadla	35
4.4 Sluneční záření	36
4.5 Shrnutí zdrojů tepelné energie.....	38
5 Teorie k bilanci sušárny	39
5.1 Periodicky pracující sušárna.....	39
5.1.1 Látková bilance	40
5.1.2 Tepelná bilance	42
5.2 Kontinuálně pracující sušárna	43
5.2.1 Látková bilance	43
5.2.2 Tepelná bilance	44

6 Parametry proudícího média v komorové sušárně	46
6.1 Odstranění vody z proudícího vzduchu	46
6.2 Komorová sušárna s tepelným čerpadlem	46
6.2.1 Bilance vody	50
6.2.2 Tepelná bilance.....	50
6.3 Zvýšení teploty sušícího média	52
6.3.1 Bilance vody	53
6.3.2 Tepelná bilance.....	54
6.4 Komorová sušárna v celkovém procesu	55
6.4.1 Bilance vody	58
6.4.2 Tepelná bilance.....	58
6.5 Srovnání otevřeného a uzavřeného oběhu	59
7 Návrh tepelného výměníku	63
7.1 Volba teplosměnné plochy	63
7.2 Uspořádání žebrovek.....	65
7.3 Rozměry kanálu a průtočný průřez.....	66
7.4 Podobnostní čísla.....	67
7.5 Součinitel prostupu tepla	68
7.6 Výpočet potřebné plochy a porovnání se skutečnou plochou.....	70
7.7 Tlaková ztráta	72
7.7.1 Tlaková ztráta na straně žeber	72
7.7.2 Tlaková ztráta uvnitř trubek	73
7.8 Obrázky a technické výkresy navrženého tepelného výměníku.....	76
Závěr	81
Seznam použitých zdrojů	83
Seznam použitých symbolů a zkratek	86
Seznam obrázků	90
Seznam tabulek	91
Seznam grafů	91

Úvod

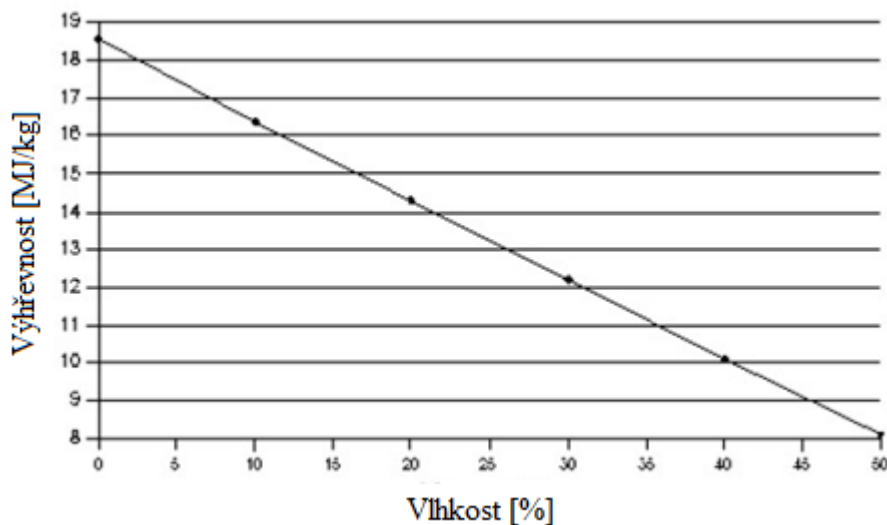
V současné době dochází k snižování energetických nároků různých budov či procesů. Důvod je jasný, snížit potřebnou energii. V případě budov se využívají kvalitnější izolace, více komorová okna, úspornější a účinnější zařízení. Na druhou stranu elektrárny a teplárny pro zvýšení účinnosti používají regeneraci tepla. Ta zvyšuje účinnost v těchto zařízení řádově o desetiny až jednotky procent. Velmi často se začíná využívat rekuperace. Jedná se o zpětné získávání části energie. Uplatňuje se například v elektromobilech a veřejných dopravních prostředcích. Asynchronní motor při brzdění pracuje jako alternátor a produkuje elektrickou energii. Dále se tento proces využívá u vypouštěného odpadního vzduchu či jiného druhu média. Z proudu odpadního média se odebere tepelná energie. Ta je následně využita pro předehřev používané látky.

Proces sušení se využívá v mnoha odvětví. Příkladem může být stavebnictví a energetický průmysl. Zde se z materiálů odstraní přebytečná voda za účelem změny jejich vlastností a v případě energetického průmyslu se docílí vyšší výhřevnosti paliv. Sušení je energetický náročné. Ze sušárny odchází teplý odpadní vzduch společně s odpařenou vodou. Proto je vhodné využít regeneraci tepla a vody. Získá se část tepelné energie proudícího vzduchu, ale i část tepelné energie „uložené“ ve vypařené vodě.

Práce se bude zabývat procesem sušení a sušícími zařízeními. Zmíněny budou teplotní parametry jednotlivých zařízení a jejich energetická náročnost. Jelikož většina sušících zařízení využívá vzájemné působení proudícího média a sušeného materiálu, přenos energie probíhá konvencí, neobejdou se sušárny bez tepelné energie. Proto bude následovat i kapitola o tepelných zdrojích. V další kapitole budou stanoveny parametry proudícího vzduchu a celkový náhled na sušárnu. Cílem práce je navrhnout regenerační výměník s kondenzací vodních par a separací kondenzátu.

1 Proces sušení

Jedná se o děj, při kterém se účinkem tepelné energie snižuje obsah kapaliny v materiálech. Nejčastěji odstraňovanou kapalinou je voda. Sušení materiálu lze rozdělit na dvě fáze: první je pohyb vody z vnitřní části materiálu na jeho povrch a druhou je „odebrání“ vody z povrchu sušicím médiem. Obě zmíněné fáze probíhají současně. Kapalina se odstraňuje z povrchu materiálu vypařováním. Pokud se kapalina z materiálu odstraní mechanickým nebo chemickým způsobem, například filtrací, lisováním apod., nejedná se o proces sušení. Cílem sušicího procesu je snížení obsahu vody v materiálu, následkem toho se změní jeho vlastnosti. Při sušení materiálu dochází ke změně jeho fyzikálních a chemických vlastností, které jsou potřebné například pro metalurgický a chemický průmysl. Sušení nalezne využití k výrobě stavebních materiálů a nábytku, například dřevěných desek a trámů. V energetice se sušení uplatňuje k odstraňování vody z paliva. Obrázek 1 znázorňuje závislost výhřevnosti na vlhkosti určitého druhu biomasy. Z grafu je zřejmé, že vlhkost velmi ovlivňuje výhřevnost. Při dostatečném snížení obsahu vody, lze docílit téměř dvojnásobné výhřevnosti. Dále se zlepšuje proces spalování. V potravinářském a zemědělském průmyslu se tento způsob využívá k zlepšení konzervačních schopností určitého výrobku.



Obr. 1 Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti [1]

Sušení je velmi rozšířený technologický proces, který nalezne uplatnění téměř v jakémkoliv průmyslovém odvětví. Z výše uvedeného grafu je jasně patrné, že většina dřevní hmoty pro energetiku je sušena. Stromy obsahují velké množství vody, respektive vlhkosti. Ta je dána druhem dřeva, polohou, stářím stromu, ročním obdobím a dokonce se může výrazně měnit i během dne. Hodnota vlhkosti dřeva se pohybuje velmi vysoko i přes 50 %, může dokonce přesahovat 100 % [2]. To znamená, že hmotnost stromu může být z více než poloviny tvořena vodou. Dřevní vlhkost se udává v procentech a jedná se o poměr hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva.

Délka sušícího procesu se může velmi lišit. Především to záleží na druhu dřeva, jeho rozměrech, počáteční a konečné vlhkosti. Proces závisí i na typu sušení. Protože doba sušení se může výrazně lišit u přirozeného a umělého sušení. Tyto dvě metody budou popsány níže. Dřeviny s vyšší hustotou se suší pomaleji. Například dubové dřevo se suší pomaleji než smrkové. Dále platí, čím větší je tloušťka, tím sušící proces bude delší. Rychlost sušení může být ovlivněna odlišnou stavbou dřevin, chemickým složením a jednotlivými vadami dřeva.

1.1 Voda uložená ve dřevě

Stromy obsahují velké množství vody. Obsažená voda ve dřevě může být rozdělena na tři typy a to vodu chemicky vázanou, vodu vázanou (hydoskopickou) a vodu volnou neboli kapilární. Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin. Tento typ vody tvoří jen velmi malou část z celkové hmotnosti dřeva. Bohužel ji nelze odstranit sušením. K jejímu uvolnění dojde pouze při spálení dřeva. Voda vázaná je obsažena v buněčných stěnách dřevní hmoty. Její odstraňování je velmi pomalé, protože pohyb vody je uskutečněn pouze difuzí. Difuze je děj, při kterém se látky z prostoru o vyšší koncentraci pohybují do prostoru, kde je koncentrace látky nižší. Posledním typem je volná voda. Ta se nachází v buněčných dutinách dřeva. Na rozdíl od vázané vody je proces odstraňování této vody relativně rychlý. Je to z důvodu trubicové buněčné struktury dřeva, která usnadňuje pohyb vody směrem ven ze dřeva. Z povrchu dřeva se voda následně odstraňuje vypařováním. Největší význam na fyzikální a mechanické vlastnosti má voda vázaná.

1.2 Přirozené sušení dřeva

Přirozené sušení dřevin probíhá na volném vzduchu. Při sušení se nevyužívá žádný zdroj tepelné energie s výjimkou slunečního záření. Z velké části je tento proces sušení ovlivněn klimatickými podmínkami. Konečná vlhkost dřeva je závislá na aktuální vlhkosti vzduchu a může se během ročního období měnit. Například dřevo může mít konečnou vlhkost v zimním období 20 % a v letním pouze 12 % [3]. Tento rozdíl je dán jiným obsahem vody ve vzduchu během roku.

Při přirozeném sušení je biomasa umístěna pod střechu nebo je s vrchní strany přikryta plechem či plachtou. Důvodem je zamezení kontaktu dešťové vody a sušeného dřeva. Z bočních stran nebývá umístěná žádná oplechování, aby zde mohl přirozeně proudit vzduch. Metoda je velmi levná, ale poněkud neefektivní. Jelikož trvá velmi dlouhou dobu. Obecně lze počítat s dobou sušení u jehličnatých a měkkých listnatých dřevin s několika týdny až 8 měsíci, v případě tvrdých listnatých dřevin může sušení trvat i několik let. Sušení probíhá různě dlouho, je to ovlivněno mnoha faktory. Hlavní je velikost sušeného materiálu, protože doba sušení bude trvat výrazně jinak dlouho pro štěpku a pro palivové dříví o velkém průměru. Dále nelze dosáhnout velmi nízkého obsahu vlhkosti. Sušení probíhá do doby, kdy se vlhkost dřeva dostane do rovnováhy s vlhkostí vzduchu. Poté vlhkost dřeva závisí na obsahu vody ve vzduchu. Když obsah vody ve vzduchu bude stoupat, tak poroste i obsah vody ve dřevě a naopak. Pomocí přirozeného sušení se suší nebo předsušují dřevěné desky. Sušené desky jsou naskládány na sebe a mezi ně jsou umístěny dřevěné hranolky. Ty oddělují jednotlivé desky a umožňují mezi nimi proud vzduchu. Tab. 1-1 znázorňuje dobu sušení dřevěné desky

o tloušťce 25 mm s konečnou vlhkostí 20 % při sušení na volném vzduchu. Jak již bylo zmíněno doba sušení je dána mnoha faktory, a proto je rozsah sušení tak velký.

Tab. 1-1 Doba sušení u 25 mm silného řeziva při sušení na volném vzduchu a s 20 % konečnou vlhkost [3]

Druh dřeva	Doba sušení [dny]	Druh dřeva	Doba sušení [dny]
měkké dřeviny		tvrdé dřeviny	
Borovice	60 - 200	Bříza	70 - 200
Smrk	90 - 200	Dub	100 - 300
		Jasan	60 - 200
		Hikory	60 - 200
		Kaštan	60 - 150
tvrdé dřeviny		Třešeň	70 - 200
Javor	50 - 200	Mahagon	60 - 150
Buk	70 - 200	Ořech	70 - 200

1.3 Umělé sušení dřeva

Druhým typem sušení je sušení umělé. Jedná se o metodu odstraňování vlhkosti, při které je přítomen cizí zdroj energie. Nejvíce využívanou energií pro účely umělého sušení je tepelná energie ze sušícího média. Sušícím médiem může být horký vzduch, spaliny, kombinace předchozích dvou nebo inertní plyn. Více o zdrojích tepelné energie bude uvedeno ve čtvrté kapitole. Umělé sušení je závislé na několika parametrech. Na teplotě sušícího média a jeho pohybu v sušícím zařízení, v případě sušení vzduchem záleží na jeho relativní vlhkosti. Dále závisí na druhu a rozměrech sušeného materiálu. Umělé sušení probíhá v zařízení zvaném sušárna. Délka sušení může trvat od jednotek minut po několik týdnů. Například komorová sušárna vysuší palivové dříví z počáteční vlhkosti 60 % na konečnou vlhkost 20 % přibližně za 4 dny [4]. Záleží na rozměrech sušícího materiálu a typu sušárny. Pár typů bude uvedeno ve třetí kapitole. Bude zde popsáno jejich využití, princip, teplotní rozsah sušícího média apod. Hlavním cílem umělého sušení je zrychlit proces sušení a podle potřeby ho lze řídit. Správným sušením lze docílit k zlepšení vlastností materiálů. K tomu slouží sušící řád, který stanovuje po jakou dobu a při jakých teplotách bude daný materiál sušen. Při nevhodném sušení může dojít u dřeva k zhoršení vlastností a k vzniku trhlin.

Pro vznik kapitoly byly využity poznatky ze zdrojů [2],[3] a potřebné hodnoty byly dohledány v jiných zdrojích uvedených výše.

2 Sušící médium

Jedná se o látku, pomocí které se uskutečňuje sušící proces. Sušícím médiem může být vzduch, spaliny, kombinace předchozích dvou nebo inertní plyn. Nejčastěji se v praxi využívá k sušení vzduch, poté následují spaliny.

2.1 Vlhký vzduch

Vzduch tvoří plynný obal Země – atmosféru. Je důležitý pro mnoho organismů na Zemi a bez jeho přítomnosti by nemohli existovat. Nachází se téměř kdekoli v blízkosti povrchu a za jeho využívání se nic neplatí. Proto je hodně využíván jako pracovní látka v různých typech zařízení. Vzduch je složen z různých plynů a par. Hlavní zastoupení má dusík, poté následuje kyslík, argon, ostatní plyny a páry. Vlhký vzduch tvořící atmosféru, je složen ze suchého vzduchu a vody. Suchý vzduch je ze směsice inertních plynů bez přítomnosti vody. Obsah vody ve vzduchu se dá vyjádřit několika způsoby a to jako absolutní, relativní nebo měrnou vlhkostí vzduchu. Rovnice pro jejich výpočet jsou uvedeny níže [5]. Nejvíce používaná je relativní vlhkost vzduchu (2.2). Dále se často využívá měrná vlhkost vzduchu (2.3). Maximální množství vlhkosti ve vzduchu, neboli nasycení bude popsáno níže.

Absolutní vlhkost vzduchu

$$\Phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V} \quad (2.1)$$

kde Φ je absolutní vlhkost vzduchu, m_p je hmotnost vodní páry, m_k je hmotnost kapalné vody, m_t je hmotnost tuhé vody (ledu), v nenasyceném a nasyceném stavu vlhkého vzduchu se $m_k = m_t = 0$, V je objem vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu

$$\varphi = \frac{m_p}{m_{p;n}} \quad (2.2)$$

kde φ je relativní vlhkost vzduchu, m_p je hmotnost vodní páry, $m_{p;n}$ je hmotnost vodní páry při nasyceném stavu, hodnoty musí být stanoveny při stejných podmínkách, tj. tlaku, teplotě a objemu

Měrná vlhkost vzduchu

$$X = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_{s,vz}} \quad (2.3)$$

kde X je měrná vlhkost vzduchu, m_p je hmotnost vodní páry, m_k je hmotnost kapalné vody, m_t je hmotnost tuhé vody (ledu), $m_{s,vz}$ je hmotnost suchého vzduchu

Vzduch dokáže pojmout jen omezené množství vody ve formě vodní páry. Toto množství silně závisí na teplotě a tlaku. Při vyšší teplotě může vzduch pojmout větší množství vlhkosti. Tabulka 2-1 znázorňuje množství vodní páry, kterou vzduch může maximálně

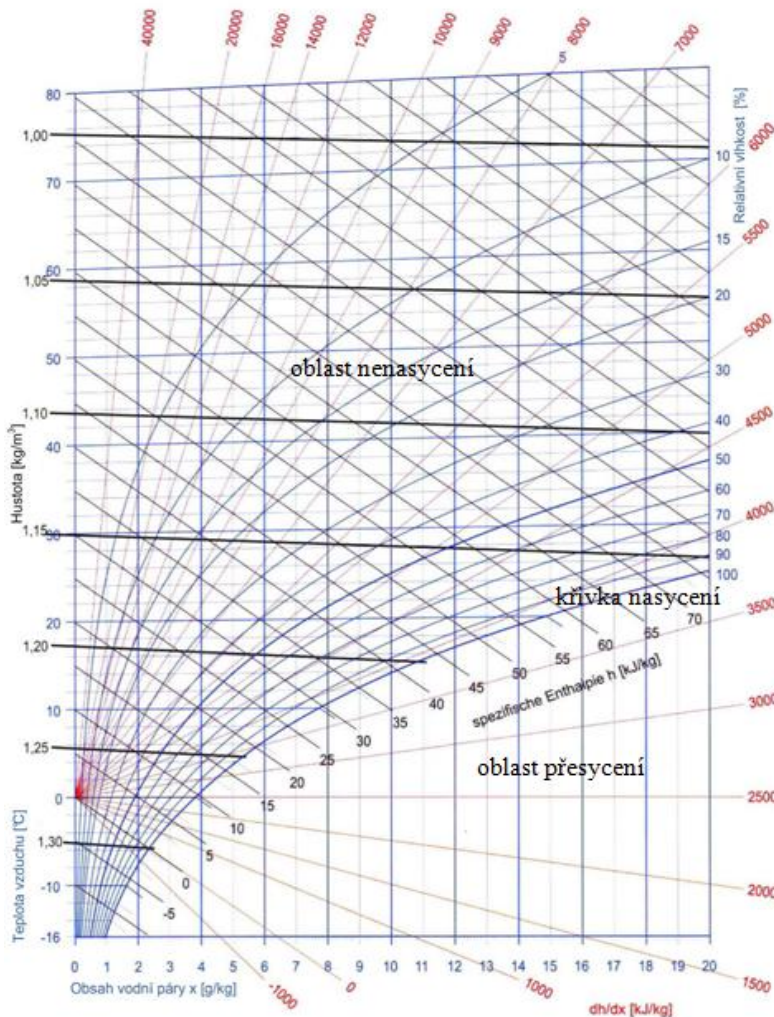
pojmout při dané teplotě a atmosférickém tlaku (101 325 Pa). Při zvyšujícím se tlaku maximální nasycení vzduchu vodou klesá [6].

Tab. 2-1 Maximální nasycení vzduchu vodní parou při atmosférickém tlaku [7]

Teplota vzduchu [°C]	Množství vody ve vzduchu [g/m ³]
0	4,8
20	17,3
40	51
60	129,4
80	290,6

Podle obsahu vody se vlhký vzduch dělí na nenasyčený, nasycený a přesycený. Obrázek 2 názorně ukazuje jednotlivé oblasti. Je-li parciální tlak vodní páry nižší než tlak syté vodní páry při dané teplotě vzduchu, jedná se o vzduch nenasyčený vlhkostí. To znamená, že

vzduch je ještě schopen pojmout určitou část vodní páry. Pokud se parciální tlak vodní páry vyrovná tlaku syté páry při dané teplotě vzduchu, bude se jednat o nasycený stav. Při tomto stavu vzduch nadále není schopen přijímat vodní páru. Nacházeli se ve vlhkém vzduchu větší množství vlhkosti, jedná se o vzduch přesycený. Prebytečná vodní pára se změní v kapalnou nebo tuhou skupenství, záleží na teplotě. Jestliže je teplota $t \geq 0 \text{ °C}$ vzniknou kapičky syté kapaliny. Při teplotě $t \leq 0 \text{ °C}$ se utvoří ledové krystaly či sníh. Pokud je teplota rovná nule, můžou se v přesyceném vzduchu objevit obě dvě fáze.

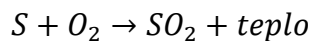
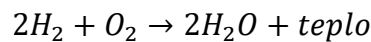
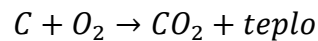


Obr. 2 Mollierův diagram [8]

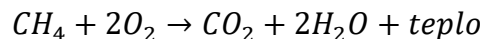
2.2 Spaliny

Spaliny vznikají spálením, tj. chemickou reakcí zvanou oxidací. Při tomto ději reaguje palivo a okysličovadlo a vzniká tepelná energie společně se spalinami. Složení spalin závisí na mnoha faktorech. Především na druhu použitého paliva. Jiné složení je u tuhých paliv, jako jsou uhlí nebo dříví a jiné u plyných paliv, jako je zemní plyn. Tuhá paliva jsou složena z hořlaviny, popeloviny a vody. Hořlavinu v tuhých palivech tvoří uhlík, vodík a síra. Dusík a kyslík obsažené v palivu jsou považovány za pasivní hořlavinu. To znamená, že do procesu spalování nepřinášejí žádnou energetickou hodnotu. Zemní plyn je převážně tvořen uhlovodíky, nejvíce metanem. Dále závisí na množství přiváděného vzduchu a dokonalosti spalování. Pokud spalování probíhá nedokonale, vzniká oxid uhelnatý. Probíhá-li správně, vzniká oxid uhličitý. Závisí i na teplotě, protože při vyšších teplotách mohou vznikat termické noxy.

Dokonalé spalování tuhých paliv



Dokonalé spalování plyných paliv



Z výše uvedených rovnic lze určit složení spalin. Ty obsahují oxid uhličitý, oxid siřičitý, vodní páru, hořlavinu uvolněnou z paliva (při nedokonalém spalování) a částice popeloviny. Proces spalování probíhá s přebytkem vzduchu. Je to z důvodu nedokonalého promíchání paliva a okysličovadla. Hlavním cílem je zajistit spálení co největšího množství hořlaviny. Protože proces probíhá při větším množství vzduchu, tak spaliny obsahují i jeho určitou část. V něm se nachází dusík, kyslík, argon, vodní pára a další plyny a páry.

Kapitola vychází se zdrojů [5],[9], případně dalších zdrojů uvedených v této kapitole.

3 Druhy sušáren

Biomasa zpravidla obsahuje velké množství vody. „Tedy má v sobě hodně vlhkosti.“ Množství vlhkosti se udává v procentech a její velikost se může lišit. Záleží na mnoha faktorech, které mohou obsah vlhkosti ovlivňovat. Vlhkost bývá často nežádoucí, proto je nutné ji z materiálu nějakým způsobem odstranit. Jak již bylo zmíněno, existují dvě metody odstranění přebytku vody, přirozená a umělá metoda.

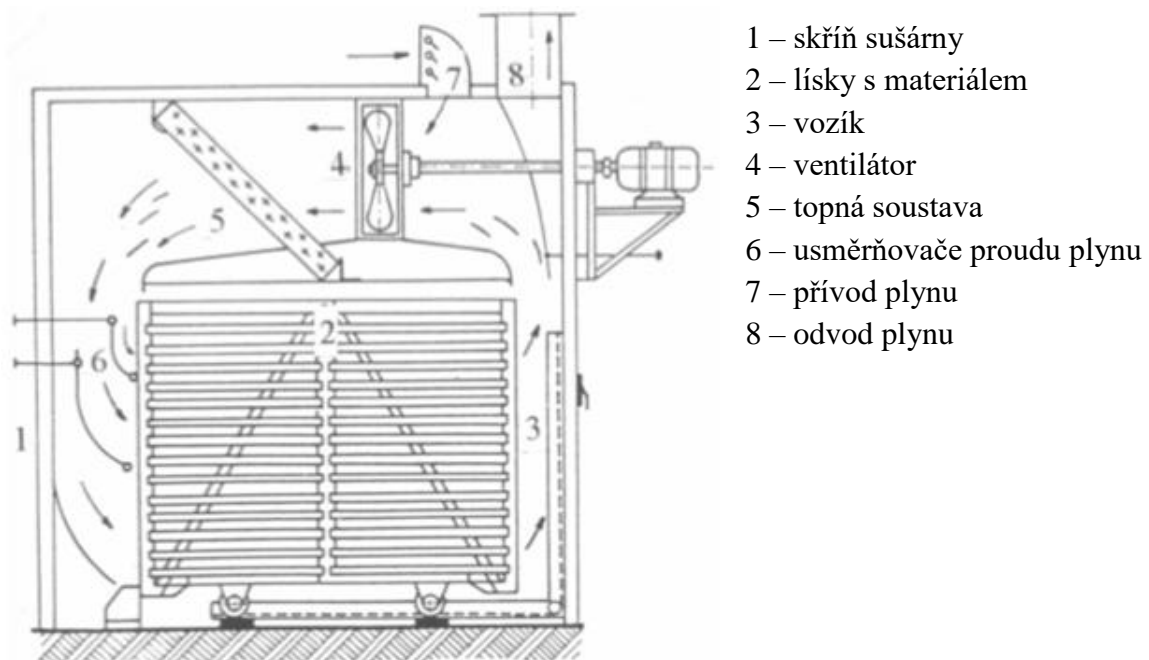
Spalování je do značné míry ovlivněno vlhkostí. Ta ovlivňuje výkon spalovacího zařízení. Pokud je vlhkost snížena, bude výkon kotle stabilnější. Při sušení se sníží v materiálu vlhkost a tím se zvýší výhřevnost. Dále se sníží emise, zvýší účinnost a zmenší se zanášení komínu a teplosměnných ploch. Hlavním parametrem pro spalování je výhřevnost, podle ní se udává cena paliva. Pro představu bude uveden zjednodušený příklad [10]: Na vstupu do sušárny je přivedeno 28 t/h štěpky s vlhkostí 50 % a výhřevností 7,78 MJ/kg. Energie uložená ve štěpce je 217,8 GJ/h. Vlivem sušení se sníží obsah vody ve štěpce a tím i její hmotnost na výstupu ze sušárny. Je-li vlhkost snížena na 30 %, bude na výstupu ze sušárny 20 t/h štěpky a její výhřevnost se zvýší na 11,86 MJ/kg. Celková energie činí 237,2 GJ/h. Pokud je vlhkost snížena na 20 %, bude její výhřevnost 13,90 MJ/kg a sušením vznikne 17,5 t/h štěpky. Celková energie v palivu je 243,3 GJ/h. Jestliže je uvažována cena štěpky 5,85 euro za GJ energie a po vynásobení této hodnoty s celkovou energií uloženou v palivu, se získá cena štěpky pro danou vlhkost. Cena štěpky vstupující do sušárny je 1274 €/h, na výstupu ze sušárny má štěpka 30 % vlhkost a její cena je 1388 €/h nebo 20 % vlhkost a její cena se pohybuje kolem 1423 €/h. Z uvedených hodnot je patrné, že při snížení vlhkosti roste výhřevnost i cena paliva. Je-li zdrojem energie odpadní teplo, tak využitím sušícího zařízení lze docílit značných zisků.

3.1 Komorová sušárna

Komorová sušárna patří k nejpoužívanějším sušárnám. Například v Severní Americe je vysušeno více než 88 % dřevní hmoty v konvekční komorové sušárně [11]. Tento druh sušárny je vhodný pro sušení různých druhů dřevin, ovoce, zeleniny, masa a bylin.

Sušárna je tvořena uzavřenou komorou. Ta je tepelně izolovaná, kvůli zamezení tepelným ztrátám. Čím lepší izolace, tím budou menší tepelné ztráty a bude potřeba dodat méně tepla. Do sušárny jsou umístěny vozíky s naskládanými dřevěnými deskami. V případě sušení menších materiálů jsou na vozíky umístěny lísky, na které se umístí daná surovina. Sušení probíhá prouděním teplého vzduchu skrz naskládané desky nebo lísky. Vzduch je nasáván z vnějšího okolí a proudí přes tepelný výměník. Zde dochází k předání tepelné energie mezi parou a vzduchem, případně horkou vodou a vzduchem. Pomocí ventilátoru je vzduch přiváděn do komory. Teplý vzduch proudí v komoře a ohřívá vlhký materiál. Z něho se pomalu odpařuje voda a odchází společně se vzduchem. Část vlhkého vzduchu opouští sušárnu a je vypouštěn komínem. Zbytek, který neopustí sušárnu, znovu prochází přes komoru společně s nově přivedeným ohřátým vzduchem. Množství přivedeného a odvedeného vzduchu je řízeno klapkami, které jsou umístěny na vstupu a výstupu ze sušárny. Obrázek 3 znázorňuje komorovou sušárnu. Ta může být postavena jako budova nebo v menším provedení jako kontejner nebo skříň. Kontejnerové sušárny naleznou uplatnění k sušení dřevěných desek nebo

palivového dřeva. Skříňová sušárna je používána k sušení velmi malého množství produktu, například ve farmácii.



Obr. 3 Komorová sušárna [12]

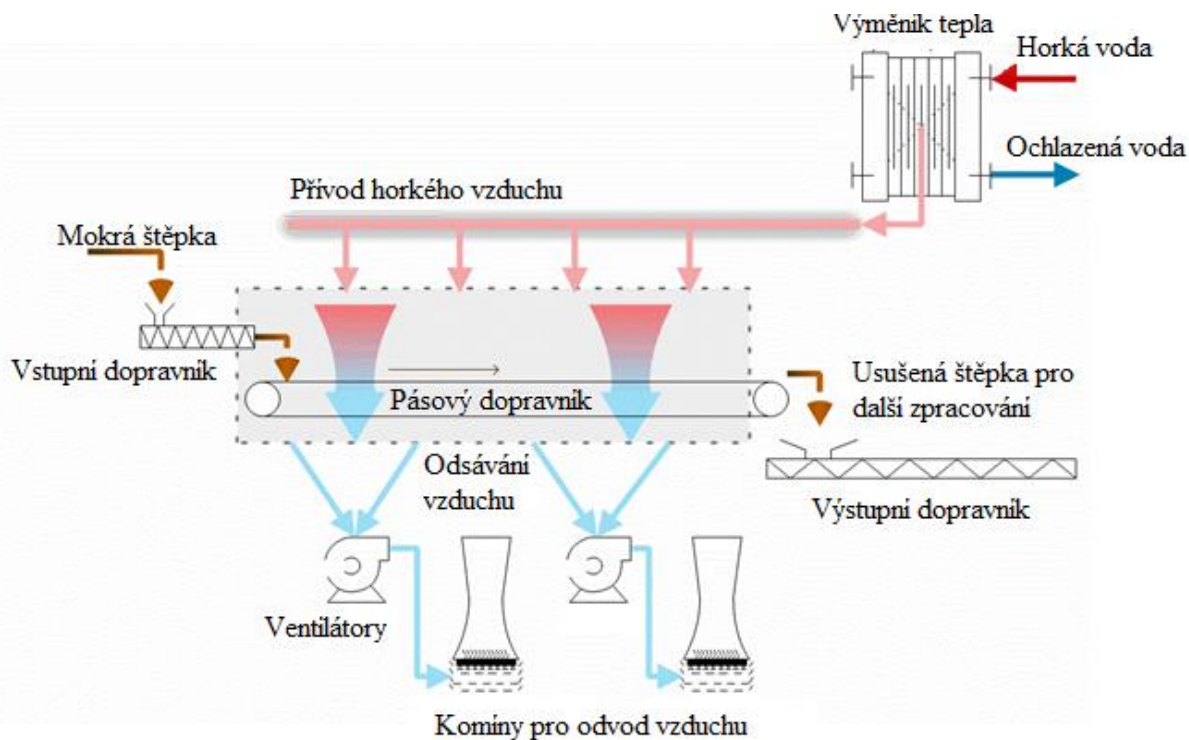
Sušícím médiem je teplý vzduch a jeho teplota se pohybuje v rozmezí 50 °C až 150 °C [11]. Vlhkost výstupního produktu se pohybuje kolem 20 % a níže. Vlhkost sušiny a rychlost sušení je ovlivněna počáteční vlhkostí materiálu, teplotou a rychlostí proudění vzduchu. Nejvíce však záleží na velikosti a druhu sušeného materiálu. Sušení může probíhat od jednotek hodin do několika týdnů. Například desky ze smrkového dřeva o tloušťce 50 mm a počáteční vlhkostí 55 % budou vysušeny na vlhkost 16 % za 160 hodin. Dubové desky o tloušťce 25 mm a vlhkosti 50 % se budou sušit 580 hodin na výstupní vlhkost 8 % [13]. Spotřeba tepelné energie v komorové sušárně se pohybuje v rozmezí 3,721 – 6,978 $\frac{MJ}{kg}$ [14].

3.2 Pásová sušárna

Pásová sušárna je zařízení, které slouží k odstranění přebytečné vlhkosti v materiálech. Zařízení může být uplatněno k sušení dřevní hmoty (štěpky, pilin, kůry, apod.), zemědělských plodin jako jsou obiloviny, ale i k sušení tuhých odpadů. Pro efektivní spalování a „ekologickou“ likvidaci mohou být pásové sušárny uplatňovány ve spalovnách komunálního odpadu. Vlhkost, která je obsažena v odpadu, se v sušárně odpaří. Poté je odpad zaveden do spalovací komory, kde se snáze spálí.

Pásové sušárny společně s bubnovými jsou nejvíce používané zařízení, které kontinuálně vysušují materiál. Pásová sušárna se skládá z jednoho, či více pásových dopravníků (sušících pásů). Pokud má sušárna více pásových dopravníků, tak jsou dopravníky umístěny nad sebou. Jednotlivé sušící pásy se pohybují opačným směrem. Na vrchní pás je zaveden mokrý materiál. Ten se s pásem pomalu pohybuje a na konci dopravníku padá na níže umístěný pás.

Z nejnižšího umístění dopravníku je materiál odváděn pryč ze sušárny. Má menší obsah vody, než měl na vstupu. Sušení probíhá proudem teplého vzduchu, který je přiváděn ze spodní nebo horní strany. Jako zdroj energie může sloužit i odpadní teplo z tepláren nebo elektráren. Obrázek 4 znázorňuje pásovou sušárnu. Na dopravník je přivedena mokrá štěpka. Z ní se odpařuje voda vlivem proudícího horkého vzduchu, který byl přiveden do sušárny z výměníku tepla. Vzduch se postupně ochlazuje a je odsáván pryč ze sušárny. Na konci dopravníku opouští vysušená štěpka sušárnu.



Obr. 4 Technologické schéma pásové sušárny [10]

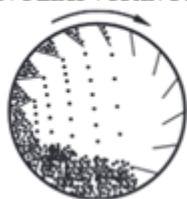
Sušícím médiem je zpravidla teplý vzduch a jeho teplota se může pohybovat od 60 °C do 120 °C [15]. Materiál je obvykle vysušen na hodnotu kolem 15 až 20 %. Minimální vysušení u běžných zařízení může dosahovat 8 až 10 %. U nejlepších pásových sušáren, můžou mít některé produkty sušení za určitých podmínek zbytkovou vlhkost jen 2 % [16]. Vlhkost výstupního produktu lze ovlivnit teplotou přiváděného vzduchu, rychlostí proudění sušícího média, rychlostí pásového dopravníku a vstupní vlhkostí materiálu. Doba sušení závisí taky na druhu materiálu a jeho zrnitosti. Při sušení nedochází k mechanickému poškození sušícího materiálu a vzhledem k nízkým teplotám je u těchto zařízení i nižší riziko požáru. U největších zařízení může dojít k vypaření až 30 tun vody za hodinu [16]. Spotřeba tepelné energie na odpaření jednoho kilogramu vody se pohybuje v rozmezí 4 až 5 MJ [17].

3.3 Bubnová sušárna

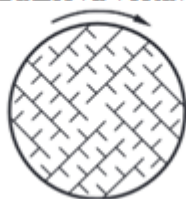
Jak již bylo zmíněno, bubnová a pásová sušárna patří mezi nejpoužívanější kontinuální sušící zařízení. Bubnová sušárna lze uplatnit v mnoha oblastech, jako jsou stavebnictví, metalurgie, chemický a potravinářský průmysl. V případě energetického průmyslu se používá k sušení paliv (uhlí, pilin, štěpky, atd.).

Hlavní částí sušárny je buben (dutý válec), který má průměr od 1 do 3 m a délku až 15 m. Buben je umístěný na rámu a je mírně nakloněn. Na jeho vnější straně je umístěno ozubení a pomocí hnacího soukolí a elektromotoru se buben otáčí. Otáčky bubnu jsou pomalé zpravidla jednotky za minutu. Materiál může být sušen přímo nebo nepřímou. U přímé metody proudí horký vzduch nebo spaliny skrz buben a dochází k přímému kontaktu sušícího materiálu se sušícím médiem. Vzhledem k proudění se sušárna s přímou metodou dělí na protiproud nebo sou proud. U nepřímé metody je ohříván plášť válce a tepelná energie se přenáší na materiál skrze plášť. Druhá metoda je méně efektivní než první, protože nedochází ke kontaktu materiálu a sušícího média. Výhodou je, že sušící materiál není znečištěný. Dále u přímé metody dochází k úletu jemných částic. Pokud se suší jemný materiál, je výhodnější použít nepřímou metodu. Podle druhu materiálu jsou ve vnitřním prostoru bubnu umístěny různé

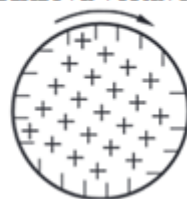
Zvedací vestavba



Příhradková vestavba



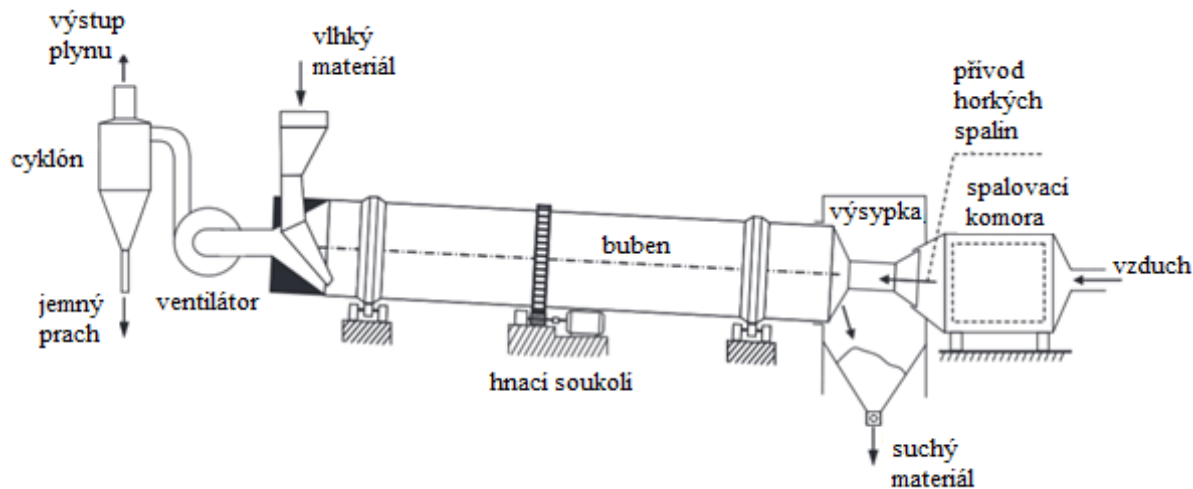
Křížová vestavba



vestavby (obrázek 5). Ty zajišťují lepší promíchání materiálu. V případě přímého sušení zvětšují kontaktní plochu materiálu se sušícím médiem.

Obr. 5 Typy vestavby bubnové sušárny [18]

Na obrázku 6 je znázorněna bubnová sušárna. Vlhký materiál je přiváděn do vrchní části bubnu. Sušící prostor nemůže být zcela zaplněn materiálem, protože by došlo k ucpání válce. Dále by sušení bylo velmi omezené, jelikož k některým částem by sušící médium neproniklo. Pomalým otáčením bubnu se materiál přesypává směrem dolů k výsypce. Z výsypky odchází materiál s menší vlhkostí, než byla na vstupu do sušárny. Otáčení je zajištěno vnějším ozubením bubnu, hnacím soukolím a elektromotorem. K sušení se používá horký vzduch nebo horké spaliny, které vznikly ve spalovací komoře. Na obrázku níže je zapojení protiproudé. U tohoto zapojení dochází k úletu jemných prachových částic. Aby tyto jemné částice neunikaly do atmosféry, bude nutné je od spalin oddělit. Použitím cyklónu nebo filtru dojde k oddělení spalin a jemného prachu.



Obr. 6 Rotační bubnová sušárna [18]

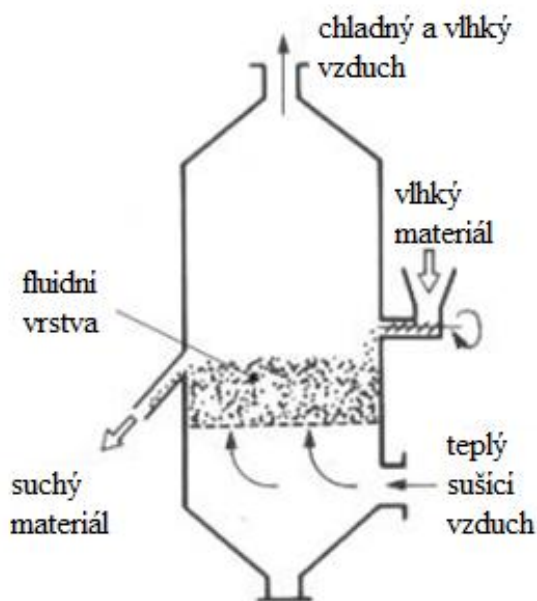
Sušícím médiem u bubnových sušáren může být horký vzduch, spaliny nebo jejich kombinace. Teplota vstupujícího sušícího média u tohoto typu zařízení může dosahovat až 550 °C [19]. Při tak vysoké teplotě a velmi nízké vlhkosti může dojít k zahoření sušiny. Výstupní vlhkost je podobná jak u pásových sušáren a obvykle se pohybuje kolem 15 %. Při sušení lze dosáhnout i nižší vlhkosti kolem 4 %. Je-li vyžadována tak nízká vlhkost, sníží se tím i množství vysušeného materiálu. Vlhkost výstupní sušiny lze ovlivnit teplotou sušícího média, rychlostí otáčení bubnu. S tím souvisí doba, po kterou je materiál v bubnu sušen. Dále záleží na vstupní vlhkosti materiálu. Protože délka trvání sušení se může lišit, je-li vlhkost například 50 % nebo jen 30 %. Délka sušícího procesu může trvat jednotky minut. Množství odpařené vody se může velmi lišit, záleží na velikosti sušárny. Například sušárna BS-6 odpaří za hodinu cca 700 kg vody [20] a jednocestná bubnová sušárna KVAERNER může za hodinu odpařit až 50 tun vody [19]. Spotřeba tepelné energie na odpaření jednoho kilogramu vody je 4 až 8 MJ [17].

3.4 Fluidní sušárna

Fluidní sušárna funguje na principu fluidního kotle. Materiál zde není spalován, ale sušen. Jemný materiál je uveden do vzhosy pomocí proudícího sušícího média. Vytvoří se fluidní vrstva, skrze ni proudí sušící médium. Fluidní vrstva se chová jako kapalina. V ní se materiál promíchává, vlivem proudícího sušícího média. Rychlost proudění nesmí být moc velká, aby nedocházelo k úletu sušícího se materiálu. Fluidní sušárna slouží k sušení jemných a středně velkých materiálů, řádově jednotky mm. Sušení velkých kusů je problematické. Aby se takový materiál dostal do vzhosy, je potřeba velkých rychlostí proudění. Sušící proces by byl velmi energeticky náročný, a také by docházelo k velkému úletu jemných částic. Sušárna nalezne uplatnění v zemědělství (sušení obilí, pšenice, žita), chemickém a metalurgickém průmyslu. V energetickém průmyslu je využívána k sušení paliv, jako jsou dřevěné piliny a uhelný prach.

Fluidní sušárny lze podle provozu rozdělit na periodické nebo kontinuální. U periodických sušáren probíhá sušení danou dobu. Záleží na požadované výstupní vlhkosti materiálu. Poté je vysušený materiál odebrán, přivede se nový vlhký materiál a sušící proces může pokračovat. V případě kontinuálního provozu je materiál přiváděn a odváděn během procesu sušení.

Sušárna může mít kruhový, čtvercový, či obdélníkový průřez. Záleží na typu výrobce a požadavcích zákazníka. Sušárna je rozdělena roštem na dvě části. Do spodní části se přivádí sušící médium. To prochází roštem a dostává do vzhosy sušící se materiál. Vytvoří se fluidní vrstva. Jak již bylo výše zmíněno, v ní se sušící materiál promíchává a suší. Přivedené teplé sušící médium prochází fluidní vrstvou, předá tepelnou energii sušenému materiálu a společně s odpařenou vodou odchází pryč ze sušárny. Vlhký materiál se do sušárny dostává skrze násypku a šnekový dopravník. Materiál je po určitou dobu sušen ve fluidní vrstvě. Po dostatečném vysušení odchází ze sušárny přes výsypku. Na obrázku 7 je znázorněno proudění sušícího média, v tomto případě vzduchu. Dále je znázorněn přívod a odvod materiálu. Na obrázku níže je jedna fluidní vrstva, některé sušárny mohou mít více fluidních vrstev. Uspořádání může být nad sebou nebo za sebou. Existují i fluidní sušárny bezroštové. Ty mají tvar



Obr. 7 Fluidní sušárna [21]

ovlivnit teplotou proudícího média, dobou sušení, vstupní vlhkostí a velikostí sušícího materiálu. Množství odpařené vody na jednotku objemu je podstatně větší oproti pásové a bubnové sušárně. Důvodem jsou menší rozměry sušícího materiálu (jednotky milimetrů) a jeho lepší promíchání. Fluidní sušárna může mít tedy menší rozměry.

3.5 Mikrovlnná sušárna

Mikrovlnná sušárna pracuje na stejném principu jako mikrovlnná trouba. Hlavní součástí obou zařízení je magnetron. Ten vytváří elektromagnetické záření o určité frekvenci. Mikrovlnná zařízení pracují s velkým rozsahem frekvence. Ta může nabývat hodnot od 300 MHz do 300 GHz (1 Hertz (zkratka Hz) odpovídá jednomu kmitu za sekundu) [23]. Čím vyšší frekvence bude využita, tím rychleji se voda odpaří z materiálu. Princip mikrovlnné sušárny spočívá v průchodu vytvořeného elektromagnetického záření sušícím materiálem. Toto záření působí na molekuly vody a dochází k jejich rozkmitání. Vlivem pohybu a tření molekul vzniká tepelná energie. Pomocí tohoto tepla dochází k odpařování vody z materiálu.

Mikrovlnná sušárna je jednoduchá a nenáročná na údržbu. Sušení v ní zabere několik hodin. Závisí to na počáteční vlhkosti, druhu a jemnosti sušícího materiálu. Ke své činnosti potřebuje elektrický proud. Cena sušení je ovlivněna cenou elektrické energie. Nevýhodou tohoto zařízení je velká spotřeba elektrické energie. Mikrovlnná sušárna patří k nejdražším sušícím zařízením, protože elektrická energie je dražší oproti jiným palivům (plyn, dřevo). Sušárna se dá využít k sušení dřevěných desek, ale i jemných materiálu jako jsou piliny, rašelina a jiné materiály obsahující vodu. Sušící se desky nemůžou být příliš tlusté, protože by sušení probíhalo příliš dlouho. Tato metoda sušení je vhodná pro kvalitnější dřeviny. Je zde nižší riziko prasknutí a pokroucení.

Pro získání potřebných znalostí a informací k sepsání této kapitoly byly využity zdroje [11],[22],[23],[24] a výše uvedené zdroje.

3.6 Shrnutí sušáren

Přebytek vody lze odstranit dvěma metodami, přirozenou a umělou. U první metody není přítomen žádný tepelný zdroj (kromě slunce) a sušení závisí na klimatických podmínkách. V případě umělé metody je přítomen cizí zdroj tepelné energie. Vlivem proudícího teplého sušícího média dochází k odpaření vody z materiálu. To se děje v zařízení zvaném sušárna. Sušárny naleznou uplatnění v mnoha oborech. V zemědělském a potravinářském průmyslu k sušení živočišných a rostlinných produktů. V chemickém a metalurgickém průmyslu k sušení různých chemikálií. Menší sušící zařízení jsou využívána ve farmacii. Pro energetický průmysl se suší různé druhy paliva. Od fosilních paliv jako je uhlí až po různé druhy biomasy (například sláma nebo dřevo). Snížením obsahu vody v palivu se zvýší výhřevnost daného paliva, lépe se bude zapalovat, teplosměnné plochy a komín se budou méně zanášet.

Existuje mnoho druhů sušících zařízení, která ke své činnosti využívají různé druhy sušícího média. Převážně se používá teplý vzduch, horké spaliny nebo jejich kombinace. Sušárny mohou pracovat při různém tlaku (podtlak, přetlak i atmosférický tlak) a při různých teplotách (desítky až stovky stupňů). Třetí kapitola popisuje sušárny a pár z nich je zde uvedeno. Komorové a mikrovlnné sušárny se používají převážně k sušení dřevěných desek. Tyto desky mohou být použity jako stavební materiál nebo k výrobě nábytku. Dřevo musí být dostatečně vysušeno, aby nedošlo k popraskání a pokroucení. Nejprve se dřevěné desky vysuší v komorové sušárně. Ta vysuší dřevo do určité vlhkosti. Pokud je požadována nižší vlhkost, dosuší se desky v mikrovlnné sušárně. Ta umožní dřevo více vysušit a je k němu „šetrnější“. Nevýhodou této sušárny jsou provozní náklady, ty jsou výrazně vyšší oproti ostatním sušárnám. U komorové i mikrovlnné sušárny lze sušit i jemný materiál, jako jsou například piliny. Dalšími zde popsány sušárnami jsou pásové a bubnové. Ty patří mezi kontinuální sušárny. Sušený materiál je přiváděn a odváděn během procesu sušení. Tzn. zařízení je zastaveno pouze v případě poruchy nebo údržby. Fluidní sušárna podle typu konstrukce může být provozována kontinuálně nebo periodicky. Pásové, bubnové a fluidní sušárny jsou určeny k sušení jemných až středně zrnitých materiálů.

Sušení probíhá teplým vzduchem, horkými spalinami nebo inertním plynem. Ten proudí kolem vlhkého materiálu. Vlivem teplého plynu se obsažená voda v materiálu zahřívá a dochází k jejímu vypařování. Vodní pára společně s plynem odchází ze sušárny a je následně vypouštěna do okolního prostředí. Vypouštěná směs má desítky až stovky stupňů. Dále ve vodní páře je „uloženo“ tzv. skupenské teplo. To je teplo, které je potřeba dodat nebo odebrat látce, aby změnilo své skupenství. V případě vypaření je potřeba dodat teplo a u kondenzace odebrat teplo. Ven ze sušárny se dostává velká část tepelné energie, která není dále využita. Proto je vhodné umístit na výstup ze sušárny tepelný výměník. Tím by se snížila tepelná energie směsi opouštějící sušárnu. Pokud by došlo ke kondenzaci vodních par, byla by získaná tepelná energie navýšena o skupenské teplo vody. Sušárnu opouští směs plynu společně s drobnými částicemi sušícího materiálu. Proto je zapotřebí občas vyčistit výměník nebo před něj umístit filtr nebo cyklón. Získané teplo by se dalo využít na předehřev sušícího vzduchu nebo inertního plynu proudícího do sušárny. Použitím výměníku tepla na výstupu ze sušárny by vedlo ke snížení tepelné energie, která je potřebná k ohřevu sušícího média. Snížily by se náklady na sušení a sušící proces by byl efektivnější.

4 Zdroje tepelné energie

Tepelná energie neboli teplo je termodynamická veličina, která vyjadřuje změnu vnitřní energie (energie neuspořádaného pohybu částic). Teplo se označuje velkým Q a jeho jednotka je joule. K výpočtu předaného tepla slouží rovnice (4.1). Tepelná energie může vznikat mnoha způsoby (spalováním, jadernou reakcí, apod.). Spalování je chemická reakce, při níž reaguje palivo a oksylichovadlo. Uvolní se chemická energie uložená v palivu a vznikne energie tepelná. Jaderná reakce se podle principu dělí na štěpení a slučování. V případě štěpení dochází k rozbití jádra vlivem nárazu cizí částice (nejčastěji neutronu). Štěpí se těžká atomová jádra (například uranu). Vznikají lehčí atomová jádra a při této reakci vznikne i velké množství tepelné energie. U slučování neboli fúzi dochází k sloučení lehkých jader a vzniknou těžší atomová jádra. Například z vodíku vznikne při fúzi hélium. Tento děj se uskutečňuje za vysokých teplot a tlaku. Podobně jako u štěpení, tak i u slučování jader se vytváří teplo. Velmi často tepelná energie vzniká při nedokonalých přeměnách jednotlivých energií na jiné. Takto vzniklá tepelná energie je považována za ztráty.

Kalorimetrická rovnice

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

kde Q je teplo, m je hmotnost, c je měrná tepelná kapacita, Δt je změna teploty tj. rozdíl konečné a počáteční teploty

Tepelná energie je velmi důležitá pro každodenní činnost člověka. V praxi je možné se s ní setkat téměř kdekoliv. Důležitou roli hraje v gastronomii, kde slouží k přípravě a ohřívání pokrmů. Pomocí tepelné energie se vytápějí obytné i průmyslové objekty. Velmi důležitá je tepelná energie v energetickém průmyslu. V elektrárnách a teplárnách dochází ke spalování různých druhů paliv, v případě jaderných elektráren dochází ke štěpení. Jaderné elektrárny na principu slučování zatím nejsou v provozu, ale jejich výzkum rychle pokračuje. Vlivem spalování či štěpení dochází ke vzniku velkého množství tepelné energie. V případě jaderných elektráren dochází v primárním okruhu k ohřevu vody. Vypařování vody se provádí v sekundárním okruhu. Toto platí pro jaderné elektrárny typu VVER. Na tomto principu pracují jaderné elektrárny Dukovany a Temelín. U většiny zařízení jako jsou kotle, spalovací turbíny, kogenerační jednotky dochází k spalování různých druhů paliv. Opět vzniká teplo, pomocí kterého se ohřívá a vypařuje voda. Vodní pára pod vysokým tlakem a teplotou je pouštěna na turbínu, kterou roztáčí. K turbíně je připojena převodovka a generátor, který vytváří elektrický proud. Tímto způsobem se vyrábí velká část elektrické energie. Tuto energii lze změnit zpět na tepelnou energii pomocí topného tělesa.

K odstranění vody z materiálu se nejčastěji využívá tepelná energie. Sušení lze uskutečnit dvěma způsoby, přirozeně nebo uměle. Přirozené sušení probíhá díky slunečnímu záření. To vzniká v jádru slunce jadernými přeměnami, v tomto případě jadernou fúzí. Druhým způsobem je sušení umělé, u kterého je přítomen cizí zdroj tepelné energie a sušení probíhá v uzavřeném prostoru. Tepelným zdrojem je často kotel spalující fosilní paliva nebo biomasu. K ohřevu sušícího média se dají využít kogenerační jednotky, topná tělesa a podobná zařízení.

Pokud je v blízkosti spalovna nebo teplárna, lze využít tepelnou energii od těchto zařízení. Je-li pravidelný odběr tepla, může si sušárna domluvit s těmito podniky výhodnější ceny tepelné energie. Sušicím médiem je teplý vzduch, horké spaliny nebo jiný horký plyn. Tyto sušicí média jsou ohřívána ve výměníku tepla nebo v případě spalin, jsou přímo ze zdroje zavedeny do sušárny. Pro sušárny je výhodné umístění blízko zdroje či podniku, které mají přebytek tepla. Například podniky, které zpracovávají ropu a ocel.

4.1 Kotel

Kotel je nejpoužívanější zařízení pro výrobu tepelné energie. Ve spalovací komoře neboli ohništi dochází ke spalování paliva. Chemická energie uložená v palivu se spálením v ohništi uvolní a vznikne tepelná energie. Vzniklé teplo působí na tepelný výměník a ohřívá nebo vypařuje kapalinu zpravidla vodu. Výstupním produktem kotle je horká voda nebo pára. Kotle jsou rozdělovány podle mnoha kritérií. Vzhledem k použitému palivu jsou kotle rozlišovány na plynové, kapalně, na tuhá paliva nebo na elektřinu. Podle vzájemného proudění spalin a vody se kotle rozlišují na vodotrubné a žárotrubné. V případě vodotrubného kotle voda proudí v trubkách výměníku a spaliny se pohybují vně trubek. U žárotrubného kotle tomu je naopak. Spaliny proudí v trubkách a voda je kolem nich. V praxi se používají kotle rozdílných výkonu. Nejmenší mají výkon od jednotek do desítek kW (watt zkráceně W označuje jednotku výkonu). Ty jsou převážně využívány pro vytápění rodinných domů. Kotle výkonu od stovek kW do jednotek MW mohou být považovány za středně velká zařízení. Jejich výkon je dostatečný k vytápění větších obytných budov, jako jsou například panelové domy. Dále mohou sloužit k vytápění průmyslových budov a k výrobě páry pro různé technologické procesy. Kotle, které mají výkony desítky a stovky MW jsou převážně určeny k výrobě páry. Ta roztáčí turbínu a pomocí generátoru se vyrábí elektrický proud.

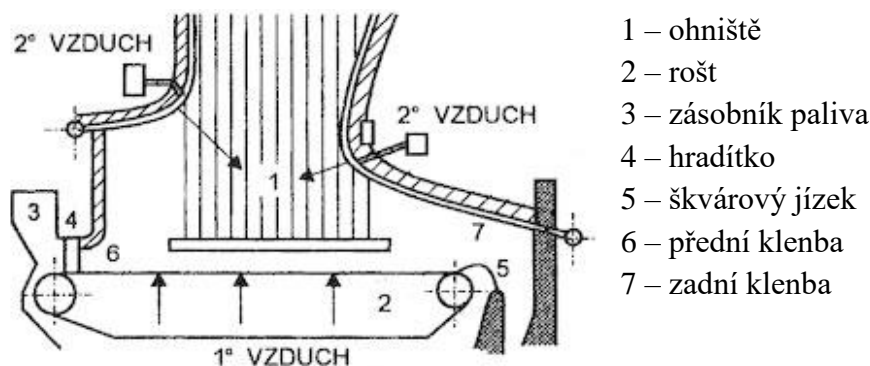
Existuje mnoho typů kotlů, které se liší použitým palivem, principem a dalšími parametry. Nejvyšší výkony mají zpravidla kotle na tuhá paliva. Ty se podle typu ohniště dělí na roštové, fluidní a práškové. Kotle tohoto typu mohou dosahovat výkonu desítky až stovky MW. Pro výrobu tepelné energie, která je následně využita pro účely sušení, jsou tyto kotle příliš výkon. Proto bude níže uvedeno několik typů kotlů, které patří do skupiny méně nebo středně výkonných kotlů a současně jsou vhodné pro průmyslové použití. Například jako zdroj tepelné energie pro sušárny.

4.1.1 Roštový kotel

Roštové kotle slouží ke spalování tuhých paliv. Ta musí mít dostatečnou velikost, aby nepropadala skrze rošt. Kotle tohoto typu mají různé výkonu. Menší zařízení slouží pro vytápění obytných prostor. Střední a větší roštové kotle mohou sloužit k vytápění průmyslových prostor nebo k výrobě páry, která může být využita pro technologické procesy nebo k výrobě elektrické energie. Palivem pro tyto kotle se hojně využívalo uhlí. V současnosti se od uhlí upouští a je nahrazováno biomasou (dřevo, sláma, apod.). Důvodem je celkové snížení vypouštění látek do ovzduší a nahrazení neobnovitelných zdrojů obnovitelnými. Dále tyto zařízení naleznout uplatnění ve spalovnách komunálních a průmyslových odpadů. A nakonec se využijí tam, kde je potřeba tepelná energie, například v sušárně. Výstupem z kotle je teplá

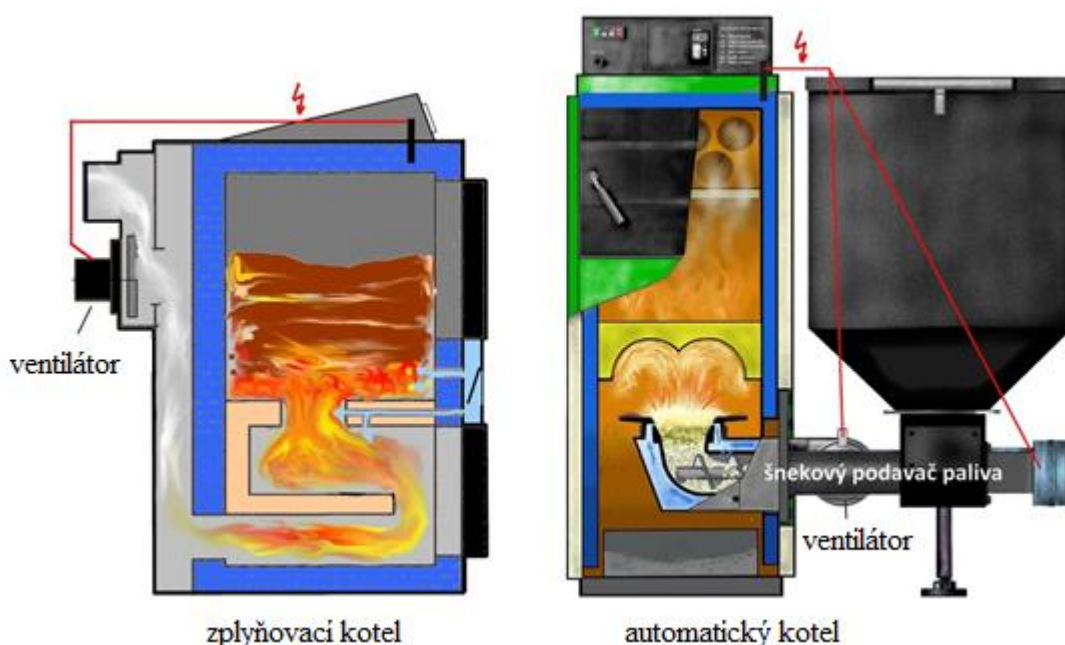
voda nebo pára. Ta je zavedena do tepelného výměníku v sušárně. Zde se předá teplo sušícímu médiu. Druhou možností je sušení spaliny. Sušící médium tvoří samotné spaliny.

Základní částí kotle je ohniště. To je prostor, kde dochází ke spalování pevného paliva. Obrázek 8 popisuje roštový kotel. Ohniště je ohraničeno roštem, bočními stěnami, přední a zadní klenbou. Podávání paliva ze zásobníku na rošt je možné pomocí jednoho ze čtyř způsobů a to násypkou, šnekovým dopravníkem, mechanickým nebo pneumatickým pohazovačem. Existuje několik typů roštů. Nejjednodušší jsou pevné, větší kotle využívají stupňovité, pásové nebo řetězové rošty. Důležitá je výška vrstvy paliva. Při vyšší vrstvě by mohlo dojít k nespálení části paliva a tato nevyužitá část by odešla z prostoru ohniště. Tím by se zvýšila ztráta kotle. Naopak při nižší vrstvě by velká část roštu nebyla využita, protože palivo by shořelo velmi rychle na začátku roštu. To platí pro pohyblivé rošty. Spálený tuhý zbytek je nazýván škvárou. Ta odchází přes škvárový jížek do škvárové výsyvky nebo propadá skrze rošt. Palivo na roštu prochází čtyřmi fázemi, sušením, odplyňováním, hoření prchavé hořlaviny a zapálení tuhé hořlaviny. Poslední fází je dohořívání tuhé hořlaviny a chladnutí tuhých zbytků. Pro dokonalé spalování je zásadní množství vzduchu. Primární vzduch je přiváděn ze spodní strany roštu a sekundární vzduch nad roštem. Sekundární vzduch slouží k dohoření prchavé hořlaviny, která odchází společně se spaliny. Za ohništěm je tepelný výměník, v případě větších kotlů skupina tepelných výměníků. Spaliny proudí kolem výměníků a předávají jim tepelnou energii. Kapaliny proudící ve výměnících se vlivem tepla zahřívá, případně vypařuje. Nejčastěji ohřívanou kapalinou je voda. Konstrukce kotlů je ovlivněna napojením jednotlivých výměníků. Rozlišují se dva typy, bubnové a průtočné. Má-li kotel buben, tak jednotlivé výměníky jsou napojeny na buben. V něm dochází k oddělení kapaliny a páry. Kapalina z bubnu je přivedena do výměníku zvaný výparník, který zpravidla tvoří stěny ohniště. Kapalina se v něm vypaří a jde zpět do bubnu. Pára z bubnu může být využita nebo je zavedena do přehříváku páry umístěného blízko ohniště. Přehřívák páry je typ tepelného výměníku, ve kterém pára zvýší svoji teplotu a následně opouští kotel. Větší zařízení mohou mít i více přehříváků páry. Bubnové kotle jsou určeny převážně pro větší výkony. Průtočné kotle nemají buben. U tohoto typu zařízení jsou jednotlivé výměníky navzájem propojeny. Nejprve dochází k ohřevu vody, vypaření a přehřátí páry. U menších zařízení se pouze ohřívá voda na požadovanou teplotu.



Obr. 8 Části roštového ohniště [25]

Podle technologie spalování se menší roštové kotle dělí na několik kategorií. Nejprve se kotle dělily na prohořivací a odhořivací. V prohořivacím kotli dochází k postupnému spalování paliva, přičemž spaliny prochází skrze vrstvu paliva. U kotle odhořivacího taky probíhá postupné spalování paliva. Rozdílem je průchod spalin druhým tahem, nikoliv skrze vrstvu paliva. U těchto dvou technologií nelze příliš ovlivňovat průběh spalování. S rozvojem technologie se objevili nové možnosti jak zefektivnit proces spalování. Jednou z nich je zplyňovací kotel. Zplyňování je proces, při kterém dochází k „řízenému“ uvolnění prchavé hořlaviny obsažené v palivu. Tento děj probíhá za určitých podmínek a omezenému množství spalovacího vzduchu. U dvou výše zmíněných kotlů dochází též k uvolnění prchavé hořlaviny, problém je její přílišné uvolnění a následný unik z prostoru ohniště. U zplyňovacího kotle dochází ke kontrolovanému spálení uvolněné prchavé hořlaviny. Nejpokročilejší z těchto kotlů je kotel automatický. Nejenže dochází k řízení přívodu spalovacího vzduchu, ale je zde pomocí regulátoru řízen i přívod paliva. Spalovací proces probíhá nejefektivněji u tohoto typu zařízení. Na obrázku 9 jsou uvedeny dva typy kotlů a to zplyňovací a automatický.



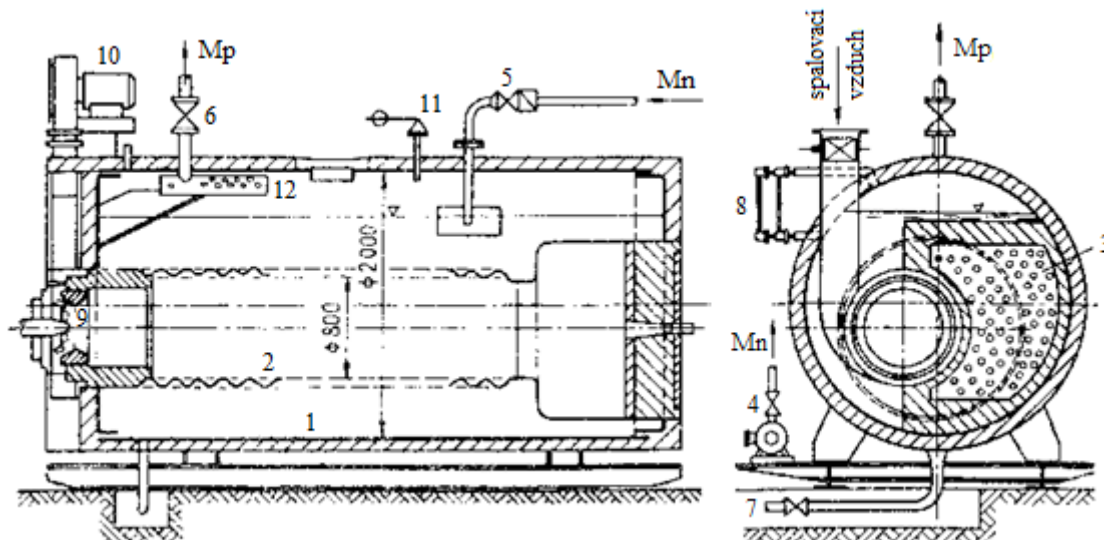
Obr. 9 Kotel zplyňovací a automatický [26]

4.1.2 Kombinovaný velkoprostorový kotel

Velkoprostorové kotle se vyznačují velkým obsahem vody a patří do skupiny parních kotlů. Předchůdce kombinovaného kotle a historicky nejstarší je kotel válcový. Ten je tvořen válcem, ve kterém je umístěna voda. Ke spalování dochází mimo válec a spaliny proudí kolem válce. Materiál válce se zahřívá a zároveň se v něm ohřívá a vypařuje voda. Druhým vývoje- vým stupněm je plamencový kotel. Důvodem jeho vzniku je zvětšení výhřevných ploch a tedy i jeho výkonu a hlavně účinnosti. Kotel tvoří válec o průměru od 1.5 m do 2.6 m. V něm je umístěn plamenec, který je tvořen válcem ze zvlněného plechu o průměru kolem jednoho metru. V plamenci je umístěno ohniště, ve kterém se můžou spalovat různá paliva. Při spalování pevných paliv je plamenec vybaven roštem a popelníkem, do kterého odpadá škvára. Pokud se spaluje plynné nebo kapalné palivo, tak je k plamenci připojen hořák na příslušné palivo.

Kotle tohoto typu můžou mít jeden, dva i tři plamenec. Není-li v plamenci umístěno ohniště, slouží jako tah kotle. Třetím vývojovým stupněm jsou kotle žárotrubné. V tomto případě došlo k nahrazení plamence žárotrubnými trubkami, které mají znatelně menší průměr a je jich tam podstatně více. V důsledku toho se zvětšili výhřevné plochy kotle 3 krát až 4 krát. Ohniště je umístěno pod nebo před válcem kotle. Dalším vývojovým stupněm jsou kotle kombinované. Jedná se o spojení plamencového a žárotrubného kotle.

Kombinovaný velkoprostorový kotel je tvořen válcem, ve kterém je plamenec a žárové trubky. Jak již bylo zmíněno, v plamenci dochází ke spalování pevných a při použití hořáku plyných nebo kapalných paliv. Spálením paliva a vzduchu se uvolní teplo a vzniknou spaliny. Ty proudí plamencem, přes obratovou komoru se dostávají do žárových trubek a nakonec do komína. Spaliny jsou velmi horké a při průchodu plamencem a žárovými trubkami jim předávají tepelnou energii. Dovnitř válce je přiváděna voda. Ta je ohřívána výhřevnými plochami a postupně dochází k jejímu vypaření. Vodní pára opouští kotel a je následně využita. Pára z kotle i spaliny se dají využít. Ve třetí kapitole je uvedeno pár sušáren, které pro svoji činnost využívají spaliny. Například bubnová sušárna by mohl být napojena na výstup kombinovaného kotle a zároveň by pára mohla být zavedena do komorové sušárny, nebo by byla využita pro různé technologické procesy. Na obrázku 10 je schéma kombinovaného kotle s jedním plamencem a žárovými trubkami.



Obr. 10 Kombinovaný velkoprostorový kotel [27]

1 – buben, 2 – plamenec, 3 – žárové trubky, 4 – napáječka, 5 – napájecí hlava, 6 – hlavní uzavírací ventil, 7 – odkalovací ventil, 8 – vodoznak, 9 – hořák, 10 – vzduchový ventilátor, 11 - pojistný ventil, 12 – parní směšovací trubka s oddělováním vlhkosti

4.2 Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotka (zkráceně KJ) je zařízení, která slouží ke kombinované výrobě elektrické a tepelné energie. Jedná se o menší zařízení, obvykle může dosahovat výkonu desítky i stovky kW. Větší kogenerační jednotky mohou dosáhnout výkonu i několik jednotek MW. KJ patří do skupiny KVET, tzn. kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Jednotky KVET jsou

často podporovány státními příspěvky a lze na ně uplatnit různé dotační programy. V současné době dochází k decentralizaci zdrojů energie a to převážně tepelné. Důvodem je zvyšování ceny tepla.

Teplo z KJ lze využít v sušárně k sušení různých materiálů. Společně s teplem se vyrábí i elektrická energie. Ta může být využita pro vlastní spotřebu sušárny, napájení zařízení či spotřebičů. V případě přebytku elektřiny, může být prodána do sítě. KJ může být tvořena pístovým spalovacím motorem, mikroturbínou (podobné zařízení jako spalovací turbína), Stirlingovým motorem, parním strojem nebo palivovým článkem.

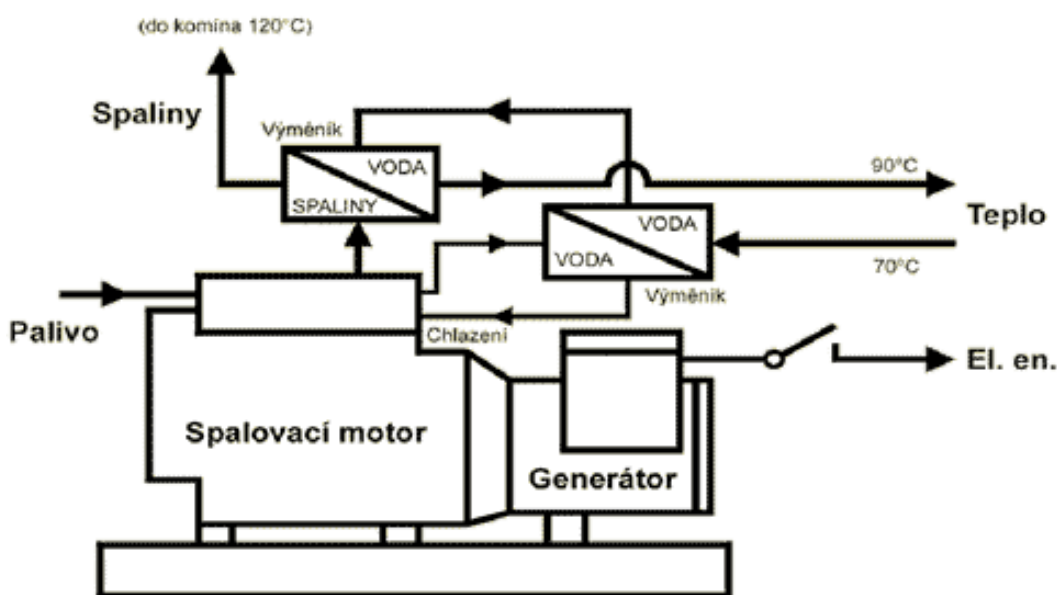
4.2.1 Pístové spalovací motory

Hlavní součástí KJ tvoří pístový spalovací motor. Ty vyžadují ušlechtilější kapalná nebo plynná paliva (nafta, zemní plyn). Po úpravě stroje lze spalovat i méně hodnotná paliva. Například skládkové a dřevní plyny, nebo různá biopaliva jako je bionafta. Tyto náhradní paliva musí mít dostatečnou čistotu. Využívají se jak vznětové, tak zážehové motory. Vznětové neboli naftové motory, spalují ve spalovacím prostoru naftu. Palivo a vzduch jsou přivedeny odděleně do spalovací komory. Palivo před vstříknutím do spalovacího prostoru je nejprve stlačeno. Tím se zvýší jeho tlak a teplota. Poté je rozprášeno ve spalovací komoře a společně se vzduchem se vznítí. Pro nastartování motoru je zapotřebí žhavicí svíčka. Ta zvýší teplotu paliva a umožní směsi se vznítit. Po zahřátí motoru není již potřeba žhavicí svíčky. Zážehové neboli benzínové motory, používají jako palivo benzín nebo různá plynná paliva (metan, bioplyn, apod.). Palivo a vzduch se smísí před vstupem do spalovací komory. Směs ve spalovací komoře je zažehuta pomocí zapalovací svíčky. Spalovací komoru u vznětového i zážehového motoru tvoří válec. Podle velikosti stroje je i určitý počet válců. Menší KJ mají dva až čtyři válce a ty největší až osmnáct válců. Ve válci dochází ke čtyřem dějům (sání, komprese, expanze a výfuk). Vlivem těchto dějů dochází k pohybu pístu nahoru a dolů. Tento pohyb je pomocí ojnice převeden na klikovou hřídel, která se vlivem pohybu pístu roztáčí. Ke klikové hřídeli je připojen rotor elektrického generátoru. Rotací rotoru generátoru dochází k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Na obrázku 11 je znázorněna kogenerační jednotka.



Obr. 11 Kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem [28]

Součástí KJ jsou tepelné výměníky, ve kterých se předává teplo ze spalin, motoru a mazacího oleje. U menších zařízení jsou spalovací motor, generátor a tepelné výměníky na jednom rámu a vzájemně tvoří jeden celek. Větší zařízení jsou sestavovány z různých modulů. Modul je často tvořen kontejnerem, ve kterém je umístěný motor nebo generátor či tepelné výměníky. Používají se trubkové a deskové výměníky. Kvůli lepšímu využití tepla jsou výměníky zapojovány sériově, jak je znázorněno na obrázku 12. První výměník je voda/voda a slouží pro chlazení spalovacího motoru a mazacího oleje. Druhý výměník je voda/spaliny, slouží k vyššímu ohřátí vody a snížení teploty spalin vstupujících do komína. Nejvíce tepla se předává ve druhém výměníku, protože spaliny vystupující z válce motoru mají teplotu přes 600 °C [29].



Obr. 12 Princip kogenerační jednotky se spalovacím motorem [30]

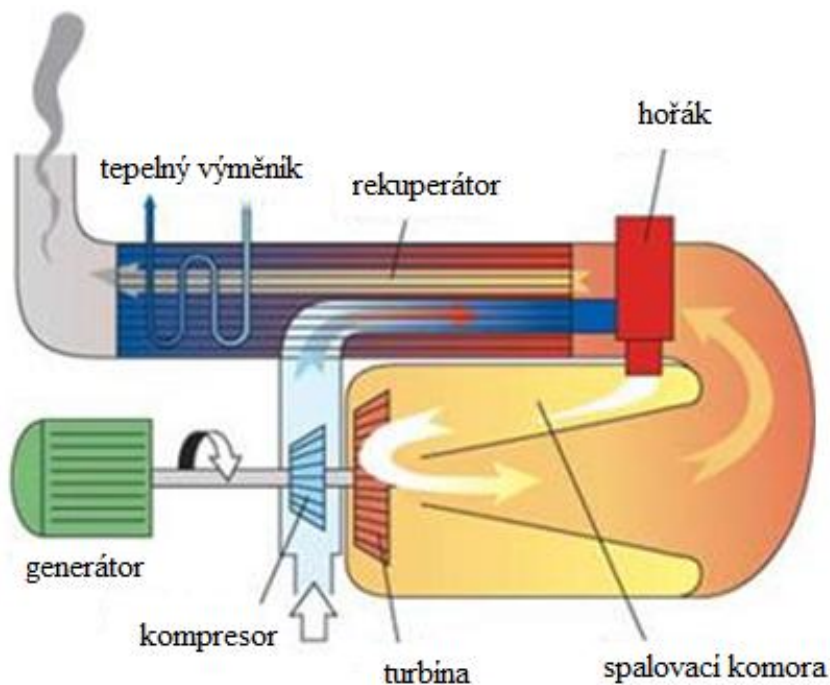
Současnou výrobou elektrické a tepelné energie lze docílit vysoké celkové účinnosti, která může přesahovat 80 % [29]. Teplo z KJ se odvádí pomocí teplé nebo horké vody. Pokud KJ vyprodukuje velké množství tepla, může vyrábět i páru. Předané teplo může být využito v mnoha aplikacích. K vytápění budov a průmyslových objektů, ohřevu teplé užitkové vody. Dále může být využito k ohřevu kapalných látek, které jsou za pokojové teploty, tj. 20 °C, v tuhém skupenství. Vzniklé teplo může být využito k sušení materiálu, například dřevní štěpky. Jak již bylo ve třetí kapitole zmíněno, tak různé sušárny potřebují ke své činnosti i různé teploty. S tím souvisí množství tepelné energie přiváděné do sušárny. U komorové, pásové a fluidní sušárny je použit k sušení nejčastěji horký vzduch. Z okolního prostředí je nasáván vzduch a ten má během ročního období různé teploty. Záleží na umístění sušárny a klimatických podmínkách. Vzduch je nejčastěji ohříván ve výměníku tepla a množství předaného tepla se během ročního období může měnit. Závisí to především na teplotě nasávaného vzduchu. Například pokud je požadována teplota sušícího média 70 °C a teplota nasávaného média bude v létě 30 °C a v zimě – 5 °C. Tak pomocí kalorimetrické rovnice, která byla zmíněna v prvním odstavci čtvrté kapitoly, se dá vypočítat potřebné množství tepla na ohřátí sušícího média na požadovanou teplotu. Z toho vyplývá, že pro ohřátí vzduchu na požadovanou teplotu se v zimním období musí ve výměníku předat více tepla sušícímu médiu. Druhým

způsob je sušení spalinami. Toto sušící médium se využívá v bubnové a místo horkého vzduchu i ve fluidní sušárně. Pokud jsou u KJ dva tepelné výměníky, jak je znázorněno na obrázku 12, tak KJ opouští spaliny o teplotě cca 120 °C. Tato teplota pro sušení v těchto zařízeních nemusí být dostatečná, proto je nutné ji zvýšit. Vyřazením druhého výměníku budou mít spaliny teplotu přes 500 °C. Což je dostatečná teplota k sušení. Zároveň musí být zajištěno chlazení spalovacího motoru a mazacího oleje, aby nedošlo k poškození zařízení.

4.2.2 Mikroturbína

Hlavní součástí zařízení je vysokootáčková plynová turbína. Výkon zařízení je menší oproti KJ se spalovacím motorem a pohybuje se v rozmezí od 10 do 100 kW. Za plynovou turbínou je často umístěn tepelný výměník, který využívá teplo odcházejících spalin. Ve výměníku dochází k ohřevu vody nebo výrobě páry.

KJ s mikroturbínou je tvořena jednostupňovou radiální turbínou, jednostupňovým radiálním kompresorem a elektrickým generátorem. Tyto tři zařízení bývají nejčastěji na společné hřídeli, jak je znázorněno na obrázku 13. Vzduch je nasáván a prochází kompresorem. Zvýší se jeho tlak a průchodem rekuperátoru se zahřeje. Stlačený a teplý vzduch je zaveden do hořáku. Zde dochází ke spálení nejčastěji zemního plynu se vzduchem. Zemní plyn musí mít dostatečnou čistotu, proto před spalovací komorou bývají umístěny palivové filtry. Spálením zemního plynu a vzduchu vznikne velké množství spalin. Ty proudí přes turbínu a roztáčí ji. Jak již bylo zmíněno turbína, kompresor a generátor jsou na jedné hřídeli. Pokud se turbína otáčí, tak současně s ní se otáčí i kompresor a rotor generátoru. Spaliny z turbíny proudí skrze rekuperátor tepla a výměníky. Poté opouští KJ.

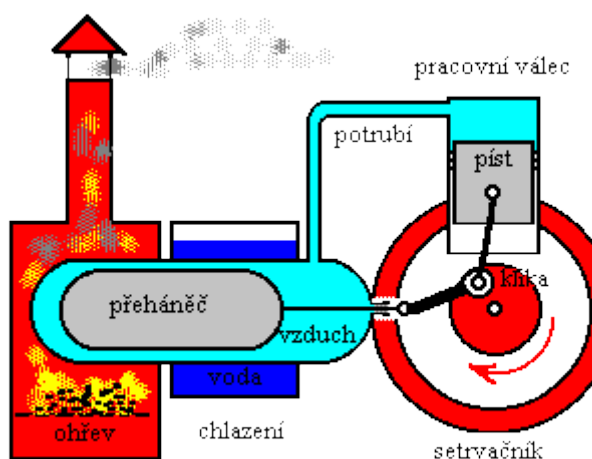


Obr. 13 Mikroturbína [31]

Celková účinnost mikroturbíny dosahuje hodnot 70 až 80 % [29]. Tepelný výkon u tohoto zařízení bývá dvojnásobný, oproti elektrickému výkonu. Tepelná energie může být využita k různým účelům, například k ohřevu teplé užitkové vody. Dále horká voda nebo vodní pára z KJ se dá využít v sušárně k ohřevu sušícího média, nejčastěji vzduchu. Ten proudí sušárnou a zahřívá molekuly vody, které se vypaří a společně se vzduchem opouští sušárnu. Sušení může probíhat i spalinami, které opouští mikroturbínu.

4.2.3 Stirlingův motor

Stirlingův motor patří do kategorie teplovzdušných motorů. Zařízení je podobné pístovému spalovacímu motoru. Obě zařízení mají pracovní válec, ve kterém se pohybuje píst. Rozdíl je v umístění spalovacího prostoru. Klasické pístové motory spalují směs paliva a vzduchu uvnitř válce. U Stirlingova motoru probíhá spalování ve vnějším prostoru. Motor má dva vzájemně propojené zdvihové prostory. V jednom se pohybuje přeháněč a ve druhém píst. Celý prostor motoru je uzavřený a pohybuje se v něm pracovní látka. Nejčastější používanou látkou je inertní plyn, například dusík.



Pracovní látka se střídavě ohřívá a ochlazuje. Celý proces bude popsán níže. Stirlingův motor existuje v mnoha variantách, záleží na konstrukci motoru. Na obrázku 14 je motor tvořen dvěma pracovními prostory, které jsou spojeny potrubím. Další častou variantou Stirlingova motoru je velký válec s přeháněčem, na kterém je umístěn menší válec s pístem.

Obr. 14 Stirlingův motor [32]

Motor je tvořen dlouhým válcem. Z jedné strany je válec ohříván a z druhé chlazen. Část válce je umístěna ve spalovacím prostoru. Jak již bylo zmíněno, zařízení má vnější přívod tepla. Proto mohou být spalována téměř jakékoliv paliva, popřípadě může být využito odpadní teplo. Nedochozí k zanášení vnitřních stěn válce a olej pro mazání motoru není kontaminován spalinami. Na další části válce je umístěno chlazení. To může být tvořeno nádrží s vodou nebo ledem. Pokud je na vnější části válce umístěno žebrování, je možné chladit vzduchem. Chlazení vodou či ledem má lepší chladicí efekt než chlazení vzduchem. V některých případech je chlazení vzduchem dostačující. V dlouhém válci, který je umístěn horizontálně, je přeháněč. Ten je tvořen lehkým dutým uzavřeným tělesem. To slouží k přemísťování studeného a horkého plynu. Přeháněč se ve válci pohybuje s dostatečnou vůlí, aby se vzduch mohl snáze pohybovat z jedné strany na druhou. Přeháněč je spojen s ojnící a klikovým mechanismem k setrvačnicku. Na stejný klikový mechanismus je připojen pracovní píst, taktéž pomocí ojnice. Pokud se přeháněč posune směrem doprava, dostane se pracovní píst do horní úvrati. Tím se vytlačí plyn z pracovního válce a z pravé strany horizontálního válce. Většina plynu se bude nacházet v levé části dlouhého válce u spalovací komory. Plyn

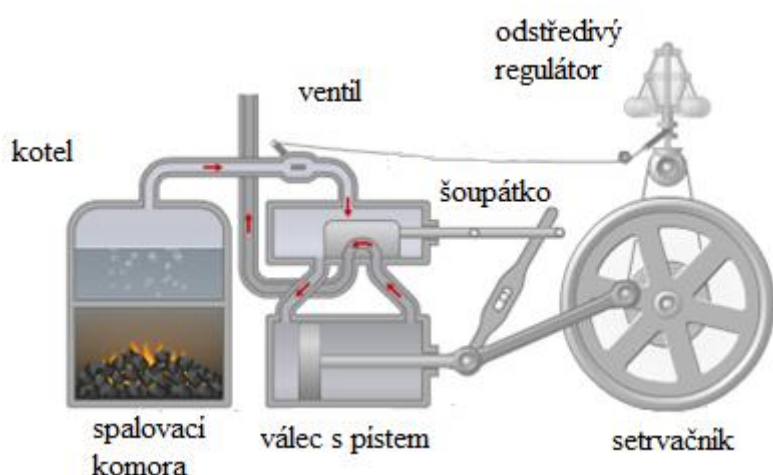
u spalovací komory se zahřeje a zvýší se jeho tlak. Začne se rozpínat, projde kolem přeháněče až do pracovního válce. Zde tlačí na píst a ten se pohybuje směrem dolů. Pomocí pohybu pístu se roztáčí setrvačnick. Při pohybu pístu směrem dolů, se přeháněč dostává do levé strany a vytlačuje horký plyn. Přesunutý plyn se dostane do chladící oblasti. Dojde ke snížení teploty a tlaku. Ve válci vznikne podtlak. Ten působí na píst a vtahuje ho zpět do pracovního válce. Tím se opět roztáčí setrvačnick a koná se práce. Při pohybu pístu směrem nahoru, se zároveň pohybuje přeháněč směrem doprava. Znova se plyn dostává do části, kde je zahříván a celý cyklus se opakuje.

Velkou výhodou tohoto zařízení je možnost spalování téměř jakéhokoliv paliva. Má vyšší tepelnou účinnost oproti motorům s vnitřním spalováním a dále je méně náročné na údržbu. Nevýhodou tohoto zařízení je vyšší cena. Odcházející spaliny lze využít v sušárně k sušení. Případně za ohniště může být umístěn tepelný výměník k ohřevu vody nebo výrobě páry.

4.2.4 Pístový parní stroj

Pístové parní stroje pracují s vodní parou. Část její energie je přeměněna na mechanickou energii a zbylá část zůstane ve formě tepelné energie. Teplo může být využito například pro účely sušení. Ve spalovací komoře se uvolňuje tepelná energie většinou z tuhé biomasy. Zdrojem tepelné energie může být i odpadní teplo. Na nádrž s vodou působí tepelná energie. Dochází k zahřátí a odpaření vody, vzniká pára. Ta proudí potrubím přes ventil do šoupátkové komory. Z ní je pára přivedena do válce. Zde působí na píst a pohybuje s ním doprava nebo doleva. Záleží na pozici šoupátka. Nachází-li se šoupátko vpravo obrázek 15, tak pára proudí do válce levým potrubím. Tlačí na píst a ten se posouvá doprava. Z této části je pára vytlačována. Je-li šoupátko vlevo, tak pára do válce proudí pravým potrubím a píst je parou tlačěn směrem doleva. Pára z levé části válce je vlivem pohybu pístu vytlačována. Pohyb pístu je přenášen na setrvačnick přes pístní tyč s klikou. Setrvačnick se vlivem pohybu pístu roztáčí. Elektrický proud se vyrábí v generátoru, který je se setrvačnickem spojen. Klika při pohybu

pístu posouvá šoupátko z jedné strany na druhou. Pro stabilizaci otáček setrvačnicku slouží odstředivý regulátor, který ovládá ventil přívodu páry.



Obr. 15 Pístový parní stroj [33]

4.3 Tepelná čerpadla

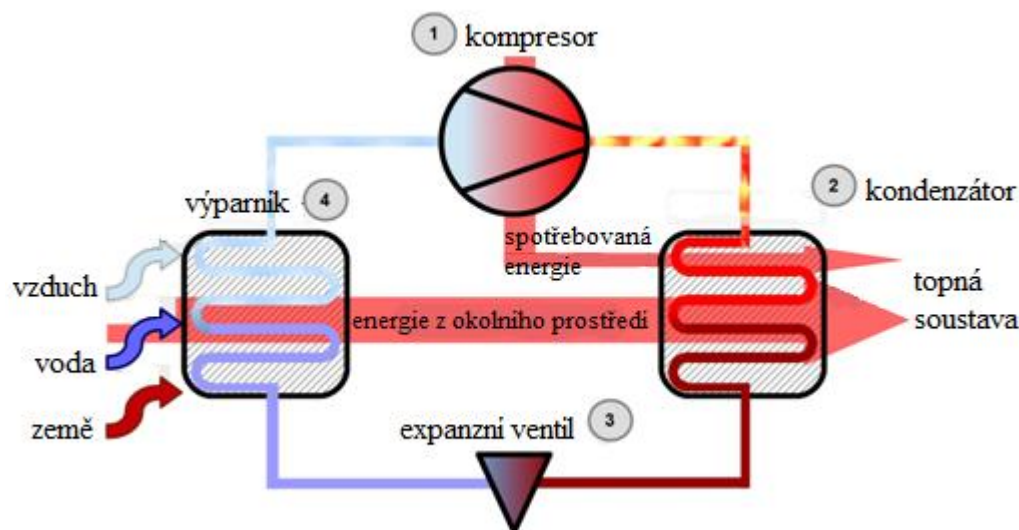
Tepelná čerpadla dále jen TČ, využívají ke své činnosti tepelnou energii. Teplo z chladnějších látek je odebráno a pomocí TČ je využito k ohřevu dané látky. Odběr tepla probíhá obvykle z většího prostoru a je dodáváno do prostoru menšího. Podmínkou správné funkce zařízení, je rozdíl teplot mezi chladivem a okolní teplotou. Přičemž výparná teplota chladiva musí být nižší než teplota okolí. To znamená, že teplo se odebírá z okolí.

TČ můžou využívat jako zdroj tepelné energie vzduch z okolního prostředí, povrchovou i podpovrchovou vodu, půdu v okolním prostředí TČ. Dále jsou schopné využívat jako zdroj tepelné energie odpadní teplo ve formě teplého vzduchu či vody. Zdroj tepelné energie by neměl být příliš ovlivněn působením TČ. Jinak by se teploty zdroje a pracovní látky mohli vyrovnat a zařízení by nefungovalo, tak jak je požadováno. Podle druhu zdroje tepla a ohřívání látky se zařízení rozlišuje na několik typů. V praxi se používají TČ typu země/voda, voda/voda, vzduch/vzduch a vzduch/voda. Před lomítkem je typ zdroje a za lomítkem ohřívání médium. S použitým typem zařízení souvisí i její cena, počáteční investice do úprav pozemku a množství získané tepelné energie. Například u TČ země/voda je potřeba dlouhý výkop nebo vrt, ve kterém je umístěna dlouhá hadice. Počáteční investice do úprav pozemku jsou vyšší než u zařízení typu vzduch/voda (postačí betonový základ). Výhodou výkopu či vrtu je relativně stabilní teplota během celého roku. Zařízení využívající vzduch jsou závislé na jeho teplotě. Ta se během roku výrazně mění.

TČ se rozdělují na tři typy, záleží na oběhu a konstrukci. Prvním a taky nejčastějším typem je zařízení kompresorové, které bude popsáno níže. Dalším typem zařízení je TČ s absorpčním oběhem. V tomto typu zařízení je kompresor nahrazen absorbérem, čerpadlem, desorbérem a do oběhu je navíc přidán další roztok. Zařízení s absorpčním oběhem má nižší spotřebu elektrické energie a je méně hlučné než kompresorové TČ. Třetím typem je hybridní TČ. To je tvořeno kombinací kompresorového a absorpčního oběhu.

Nejpoužívanější TČ je kompresorové, obrázek 16. Hlavní součástí zařízení je kompresor, kondenzátor, expanzní ventil a výparník. Zdrojem tepelné energie může být vzduch, voda nebo půda. Teplo ze zdroje působí na pracovní médium ve výparníku a dochází k odpařování média. Pracovní médium, též nazýváno jako chladivo, musí mít velmi nízkou teplotu vypařování, protože zdroje tepla jsou relativně chladné. Pokud by chladivo mělo vysokou teplotu vypařování, nedošlo by k odpaření chladiva. Páry chladiva proudí do kompresoru. Zde jsou stlačeny a výrazně se zvýší jejich teplota. Horké páry proudí přes kondenzátor. Dochází ke kondenzaci par a během ní se uvolňuje teplo. Tepelná energie je předávána ohřívání látky, vzduchu nebo vodě. Z kondenzátoru odchází chladivo v kapalném skupenství, ale s relativně vysokou teplotou a tlakem. K snížení tlaku a teploty slouží v oběhu expanzní ventil. Chladivo na výstupu z expanzního ventilu má nižší tlak i teplotu než na jeho vstupu. Snížením tlaku média se sníží i jeho vypařovací teplota. Vlivem snížení vypařovací teploty se může chladivo snáze vypařit ve výparníku a celý proces se opakuje. Jako chladivo je často využíván čpavek nebo jiná podobná látka, která má nízkou výparnou teplotu. TČ může sloužit i k odvlhčení vzduchu. Proudící vzduch nejprve projde skrze výparník. Sníží se jeho teplota a dojde

ke kondenzaci vodní páry. Ochlazený vzduch se zavede ke kondenzátoru a zde se ohřeje. Je-li teplota zdroje dostatečná, může být jako chladivo využita voda.



Obr. 16 Schéma tepelného čerpadla [34]

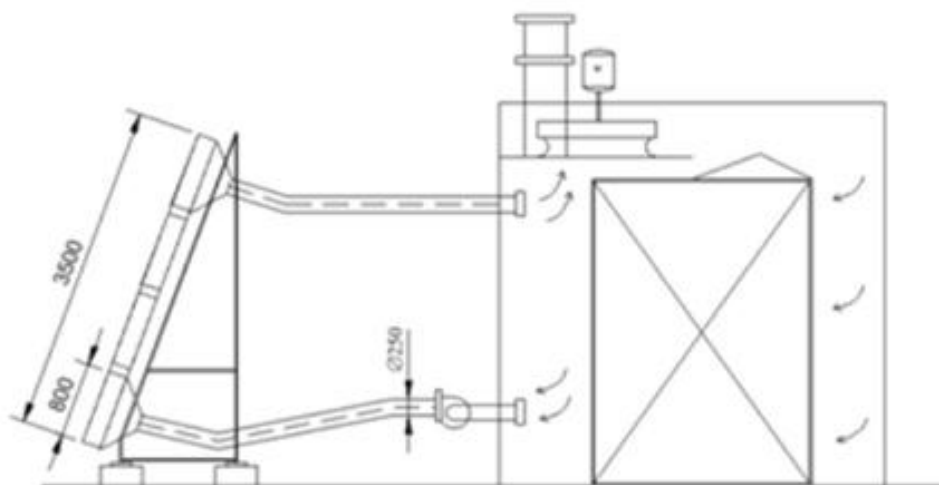
4.4 Sluneční záření

Sluneční záření je nejdostupnějším a taky nejlevnějším zdrojem energie. Vzniká vnútru slunce jadernou fúzí. Jádra lehkých prvků se slučují a vznikají těžší atomová jádra. Z vodíku při slučování vznikne hélium. Při této přeměně vznikne velké množství energie. Tento proces se děje za vysokých teplot a tlaku. Sluneční záření se šíří vesmírem a dostává se na Zemi. Lze ho využít jak k výrobě elektrické tak tepelné energie. Elektrická energie může být vyrobena fotovoltaickými panely. Sluneční záření se při dopadu na povrch mění v teplo. Záleží na druhu materiálu a jeho barevném provedení. Světlejší materiály lépe odráží sluneční záření a méně se zahřívají. V případě tmavějších materiálu dochází k většímu zahřívání, protože méně odráží sluneční záření a více ho absorbují. Proto je například v letním období v tmavějším autě větší teplo.

Solární kapalinové kolektory slouží k zachycování slunečního záření, které je následně přeměněno na tepelnou energii. Solární kolektory mají dvě základní provedení. První variantou je kolektor tvořen celistvou plochou, pod kterou jsou umístěny trubky absorbéru. Další variantou je trubicový vakuový kolektor, ten je tvořen jednotlivými trubicemi. Hlavní součástí kolektoru je absorbér. Ten je obvykle tmavě modrý až černý a tvoří ho nejčastěji měděné trubky a plechy. Na absorbér dopadá sluneční záření a mění se na teplo. Skrze trubky absorbéru prochází voda nebo nemrzoucí kapalina a pomocí vzniklého tepla se ohřívá. Účinnost solárních kolektorů se pohybuje v rozmezí 60 – 75 % [29]. Závisí to na konstrukci a použitých materiálech. Součástí těchto systémů bývá akumulární nádrž. Do ní je přivedena teplosná látka ze solárních kolektorů a předá se teplo nejčastěji vodě.

Solární vzduchové kolektory jsou velmi jednoduché. Nemusí být dokonale těsné a obvykle pracují s menšími teplotami než kapalinové solární kolektory. Solární vzduchový kolektor se skládá z několika částí a to z průhledného skla, absorbéru, izolace a rámu. Sluneční

záření nejprve projde sklem a dopadá na absorbér. Vznikne teplo a to ohřeje absorbér. Z něho se předá teplo teplonosné látce, v tomto případě vzduch, který proudí pod absorbérem. Ten je tvořen zvlněným plechem. Pro lepší přestup tepla se využívá plech s žebrováním. Většina kolektoru je tepelně izolovaná, aby teplo neunikalo do okolí. Všechny součásti jsou uloženy v rámu kolektoru. Ohřátý vzduch skrze kolektor může proudit dvěma způsoby. A to přirozeně otvory v horní a dolní části kolektoru nebo pomocí ventilátoru. Přirozené proudění vzduchu je dáno rozdílem hustot vzduchu. Chladnější vzduch má vyšší hustotu než teplý vzduch, proto teplý vzduch stoupá vzhůru. Při průchodu kolektorem se vzduch zahřívá a stoupá výše. Ve spodní části dochází k nasávání studeného vzduchu. Obrázek 17 znázorňuje využití solárního vzduchového kolektoru pro účely sušení v komorové sušárně.



Obr. 17 Schéma komorové sušárny řeziva se slunečním kolektorem [35]

Tepelná energie ze slunečního záření může být využita k přirozenému sušení palivového dříví, dřevěných desek a dalších materiálů obsahujících vlhkost. Sušení probíhá v otevřeném nebo uzavřeném prostoru. Probíhá-li sušení v uzavřeném prostoru, neboli skleníku, dochází k rychlejšímu vysušení materiálu. Tepelná energie je z velké části udržována v prostoru skleníku. Působí na sušený materiál a dochází k odpaření vody. Je nutné zajistit odvod vzduchu a odpařené vody. To probíhá buď přirozeným prouděním nebo nuceným, pomocí ventilátoru. Sušení je velmi levné a jednoduché. Na obrázku 18 je znázorněna skleníková sušárna s palivovým dřívím.



Obr. 18 Skleníková sušárna [36]

K sepsání kapitoly Zdrojů tepelné energie byly využity zdroje [5],[26],[29],[37],[38] a další zdroje uvedené v této kapitole.

4.5 Shrnutí zdrojů tepelné energie

Existuje spousta zdrojů tepelné energie. Například teplo ze spalování, geotermální energie, uvolněné teplo ze štěpení a slučování jader atd. Při spalování reaguje palivo a okysličovadlo. Při této reakci se uvolní chemická energie uložená v palivu a vznikne teplo společně se spalinami. Při štěpení dochází k rozbití jádra atomu nejčastěji neutronem. Vzniknout jádra lehčích prvků a společně s nimi i tepelná energie. Slučování jader je opakem štěpení. Nedochází k rozbití jádra prvku, ale k sloučení jednotlivých jader a vzniknout těžší atomová jádra společně s tepelnou energií.

V současnosti se pro každodenní činnost člověka nejvíce tepelná energie vytváří spalováním. Existuje velké množství zařízení, která tepelnou energii vytváří právě spalováním. Nejjednodušším zařízením je kotel s pevným roštem, který je určen pro spalování pevných paliv. Tento typ kotle může sloužit jak k ohřevu vody, tak i k výrobě páry. Dalším zde popsaným zařízením je kombinovaný velkoprostorový kotel. Ten může mít v plamenci pevný rošt a sloužit ke spalování pevných paliv. Je-li kombinovaný kotel na kapalné nebo plynné palivo, tak je vybaven hořákem na příslušné palivo. Výstupním produktem z tohoto kotle je nejčastěji pára. Dalším typem zařízení je kogenerační jednotka. Jedná se o typ zařízení, ve kterém se současně vyrábí elektrická a tepelná energie. Tato zařízení mají o něco větší využití paliva oproti kotlům, které vytvářejí pouze tepelnou energii. Do této kategorie tepelných zdrojů patří kogenerační jednotka se spalovacím motorem, mikroturbína, Stirlingův motor, pístový parní stroj a další. Každé z těchto zařízení má své kladné i záporné stránky. Například spalovací motor je jednoduché zařízení pro sériovou výrobu, nachází se téměř v každém automobilu. Tento typ zařízení využívá převážně ušlechtilé palivo, které je dražší oproti uhlí nebo dřevu. Levnější paliva jako je uhlí nebo dřevo lze využít ve Stirlingově motoru. Jelikož se čím dál více klade větší důraz na efektivnost a účinnost procesu, budou právě tato a jim podobná zařízení více využívána. Dalším výše zmíněným zařízením je tepelné čerpadlo. Jedná se o jednoduché zařízení, které se skládá z kompresoru, kondenzátoru, expanzního ventilu a výparníku. Stejně jako některé z předchozích zařízení, tak i tepelné čerpadlo ke své činnosti může využít odpadní teplo. To vzniká při mnoha procesech, například v ropných rafinériích při zpracování ropy, ocelárnách, papírnách, sušárnách, bioplynových stanicích apod. Využitím odpadního tepla se zvýší efektivnost a účinnost celého procesu. Posledním zmíněným zdrojem je sluneční záření. To může sloužit jak k výrobě elektrické energie, tak i k ohřevu vody a vzduchu. Pro ohřev některé zmíněné látky se využívá zařízení zvané sluneční kolektor.

Výše zmíněné zdroje naleznou uplatnění téměř kdekoliv. Nejlevnějším zdrojem je sluneční záření. To lze využít k výrobě elektrické energie nebo k ohřevu libovolné látky či kapaliny. Pro danou činnost se potřebuje vhodné zařízení. Spalováním se vytváří nejvíce tepelné energie. Takto vytvořené teplo slouží mnoha účelům. K vytápění rodinných, veřejných a průmyslových objektů. Teplo ze spalování se dá využít k ohřevu plynného nebo kapalného média, případně k vytvoření vodní páry. Pára může sloužit k různým technologickým procesům nebo k výrobě elektrické energie. Další uplatnění tepelná energie nalezne v sušárnách papíru, dřevní hmoty a spousta dalších.

5 Teorie k bilanci sušárny

Tato kapitola pojednává o celkovém přehledu periodických a kontinuálně pracujících sušárnách. Poznatky a vzorce z této kapitoly budou následně uplatněny v další kapitole.

Voda se nachází nejen v sušeném materiálu, ale i ve vzduchu. Je třeba s ní počítat a brát na ní ohled. Všeobecně ve vzduchu je určitá část vodní páry a její obsah se může během dne a ročního období měnit. Hmotnost vody v libovolné látce lze určit podle rovnice (5.1). Například může být využita k určení množství vody ve dřevě. Tato rovnice může být využita i pro stanovení hmotnostního průtoku, za předpokladu dosazení daných hodnot. Pro stanovení hmotnosti vlhkého vzorku postačí klasická váha. Hmotnost suchého vzorku lze určit pomocí mikrovlnné trouby nebo pomocí přesnější xylenové metody. Při využití ručního elektrického vlhkoměru se určí měrná vlhkost dřeva neboli dřevní vlhkost. Pro výpočet měrné vlhkosti nebo k přepočtu měrné vlhkosti na množství vody nebo množství sušiny slouží rovnice (5.2) případně (5.1).

Hmotnost vody v látce

$$w = m_v - m_s \quad (5.1)$$

kde w je hmotnost obsažené vody, m_v je hmotnost vlhké látky, m_s je hmotnost suché látky (u dřeva to znamená hmotnost sušiny)

Měrná vlhkost dřeva

$$X_d = \frac{w}{m_s} \quad (5.2)$$

kde X_d je měrná vlhkost dřeva, w je hmotnost obsažené vody, m_s je hmotnost sušiny

5.1 Periodicky pracující sušárna

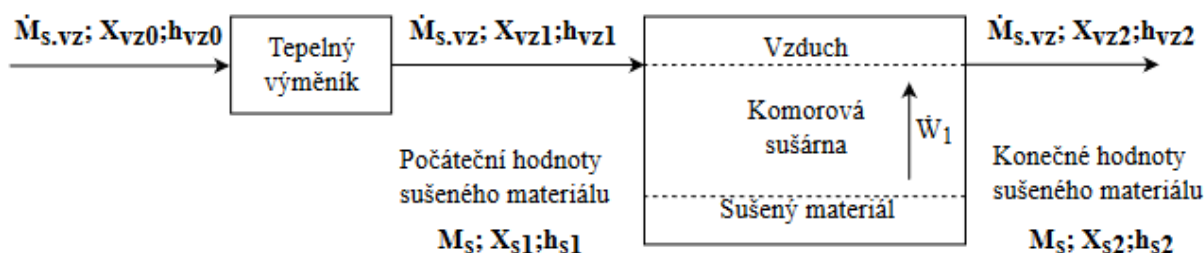
Jedná se o typ sušárny, ve které se po určitých intervalech vyměňuje sušený materiál. Nejpoužívanějším typem je komorová sušárna. Jedná se o uzavřenou komoru, ve které proudí sušící médium, nejčastěji vzduch. Běžné parametry okolního vzduchu jsou pro umělé sušení příliš nízké, proto je potřeba vzduch ohřát. To se děje pomocí tepelné energie vzniklé v některém z tepelných zdrojů. Komorová sušárna, může pracovat s otevřeným nebo uzavřeným oběhem. U otevřeného oběhu je vzduchu nasáván z okolí, zahřeje se v tepelném výměníku, projde sušárnou a vypustí se do okolí. V případě uzavřeného oběhu vzduch cirkuluje mezi sušárnou a tepelným výměníkem. Výhodnější je uzavřený oběh vzduchu, jelikož nedochází k úniku tepelné energie skrze vzduch opouštějící sušárnu.

Proces sušení v komorové sušárně probíhá následovně: Do prázdné komorové sušárny se umístí sušený materiál a komora se uzavře. Dojde k nasátí vzduchu z okolního prostředí. Vzduch proudí skrze tepelný výměník. Zde se předá tepelná energie proudícímu sušícímu vzduchu. Následně je horký vzduch vháněn do prostoru sušárny. Teplo ze sušícího média působí na vlhký materiál a dochází k odpaření vody. Poté vzduch společně s odpařenou vodní parou opouští sušárnu. To platí pro komorovou sušárnu s otevřeným oběhem. V případě

komorové sušárny s uzavřeným oběhem je vzduch nasán z prostoru sušárny a proudí do tepelných výměníků. Nejprve relativně teplý vlhký vzduch projde skrze tepelný výměník zvaný chladič. Důvodem zařazení chladiče do oběhu je snížení obsahu vody ve vzduchu. Jinak by se vzduch v sušárně přesytí vlhkostí a mohlo by dojít ke kondenzaci vody na sušeném materiálu. V chladiči se proudícímu vzduchu odebere tepelná energie. Tím se sníží jeho teplota a též i maximální nasycení. Jelikož obsah vody ve vzduchu se nezmění, stane se vzduch přesycený a tím dojde ke kondenzaci vodní páry. Za předpokladu $t > 0$ °C. Při kondenzaci se uvolní skupenské teplo. Po odstranění z kondenzovaných kapiček, vzduch projde tepelným výměníkem. Předá se mu teplo a horký je zaveden do sušárny. Působí na vlhký materiál, ze kterého se začne odpařovat voda. Následně vlhký vzduch proudí do chladiče a děj se znovu opakuje.

5.1.1 Látková bilance

Látková bilance pojednává o pohybu vzduchu, resp. vody v sušárně. Na obrázku 19 je znázorněno schéma komorové sušárny s otevřeným oběhem. Podmínky sušícího procesu jsou $X_{vz1} < X_{vz2}$ a $X_{s1} > X_{s2}$. Hmotnostní průtok suchého vzduchu v celé sušárně je dán hmotnostním průtokem suchého vzduchu na sání do sušárny. Přisávání okolního vzduchu a únik sušícího vzduchu se zanedbává. Protože sušárna pracuje s tlakem blízkým atmosférickému, tak je prisávání, resp. únik vzduchu minimální. Výměna sušeného materiálu v komorové sušárně probíhá po určitých intervalech. Je to dáno počáteční a koncovou vlhkostí dřeva, jeho typem, rozměry a parametry sušícího vzduchu. Usušený materiál se v komorové sušárně odebere až po skončení sušení.



Obr. 19 Schéma komorové sušárny s otevřeným oběhem

kde \dot{W}_1 je hmotnostní průtok odpařené vody, $\dot{m}_{s.vz}$ je hmotnostní průtok suchého vzduchu, X_{vz} je měrná vlhkost vzduchu, h_{vz} je entalpie vlhkého vzduchu vztažená na kilogram suchého vzduchu, m_s je hmotnost sušiny, X_s je měrná vlhkost dřeva, h_s je entalpie sušiny, index 0 označuje okolí sušárny, index 1 je vstup do sušárny a index 2 výstup ze sušárny

Bilance vody v sušárně je určena rovnicí (5.3). Na jedné straně rovnice je hmotnostní průtok vody vstupující do sušárny a množství odpařené vody. Na straně druhé je hmotnostní průtok vody vystupující ze sušárny. Hmotnostní průtok odpařené vody lze vypočítat podle rovnice (5.4)

Bilance vody v sušárně

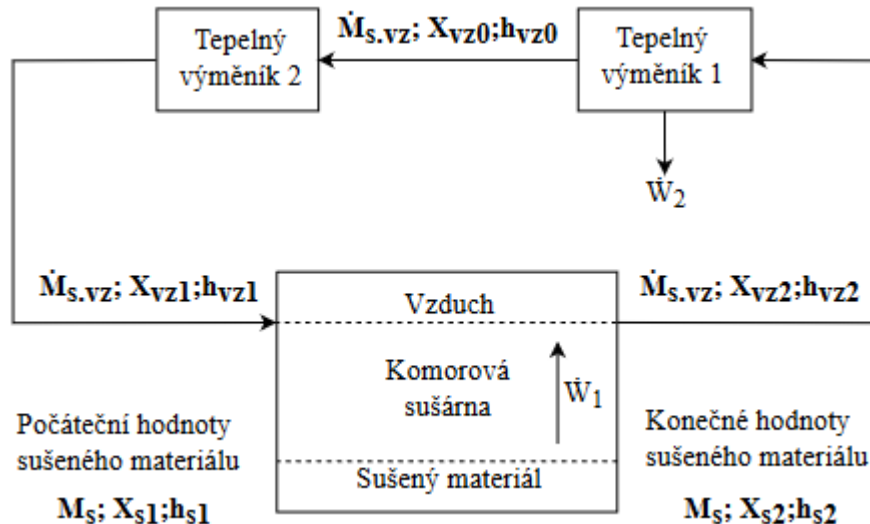
$$\dot{m}_{w1} + \dot{W}_1 = \dot{m}_{w2} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz1} + \dot{W}_1 = \dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz2}$$

Hmotnostní průtok odpařené vody

$$\dot{W}_1 = \dot{m}_{s,vz} \cdot (X_{vz2} - X_{vz1}) \quad (5.4)$$

Pro snížení spotřeby tepelné energie se v případě komorové sušárny využívá uzavřený cyklus obr. 20. Pro uzavřený cyklus platí rovnice (5.3) a (5.4) podobně jako u otevřeného cyklu. Množství zkondenzované vody je dáno rovnicí (5.5) a (5.6). Při spuštění sušárny je v počáteční fázi $\dot{W}_1 = 0$, ale množství zkondenzované vody v tepelném výměníku 1 nemusí být nulové, platí rovnice (5.5). Záleží na vlhkosti vzduchu při spuštění sušárny.



Obr. 20 Schéma komorové sušárny s uzavřeným oběhem

kde \dot{W}_1 je hmotnostní průtok odpařené vody, \dot{W}_2 je hmotnostní průtok zkondenzované vody, $\dot{m}_{s,vz}$ je hmotnostní průtok suchého vzduchu, X_{vz} je měrná vlhkost vzduchu, h_{vz} je entalpie vlhkého vzduchu vztážená na kilogram suchého vzduchu, m_s je hmotnost sušiny, X_s je měrná vlhkost dřeva, h_s je entalpie sušiny, index 0 označuje výstup z tepelného výměníku 1, index 1 vstup do sušárny a index 2 výstup ze sušárny

Hmotnostní průtok zkondenzované vody

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_{s,vz} \cdot (X_{vz2} - X_{vz0}) \quad (5.5)$$

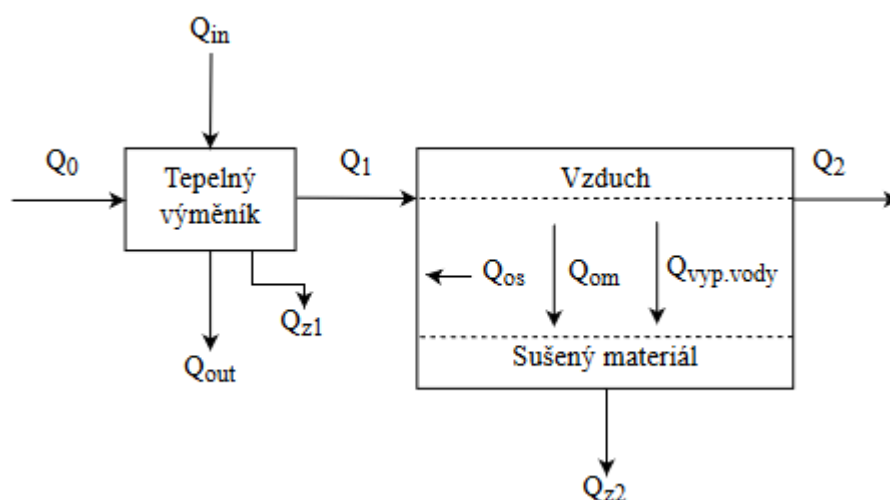
Hmotnostní průtok zkondenzované vody při dosažení pracovních parametrů sušícího média

$$\dot{W}_2 = \dot{W}_1 = \frac{n}{3600} \quad (5.6)$$

kde \dot{W}_1 je hmotnostní průtok odpařené vody, \dot{W}_2 je hmotnostní průtok zkondenzované vody, n je hmotnost odpařené, resp. zkondenzované vody za hodinu

5.1.2 Tepelná bilance

Tepelná bilance udává množství tepelné energie, která vstupuje a vystupuje z určitého procesu. Teplo je značeno Q a jeho jednotka je joule. Tepelný tok je označován \dot{Q} a jeho jednotka je watt. Obr. 21 znázorňuje tepelnou energii v sušárně a tepelném výměníku. Tepelná bilance výměníku je dána rovnicí (5.7). Tepelná bilance sušárny je znázorněna rovnicí (5.8). V rovnici je potřeba odečíst výparné teplo vody, jelikož toto teplo je již obsaženo ve vzduchu opouštějící sušárnu. Při neodečtení této hodnoty by v rovnici byla započtena dvojnásobná hodnota na odpaření daného množství vody. Tepelný tok proudícího vzduchu je možné určit podle rovnice (5.10).



Obr. 21 Schéma komorové sušárny s otevřeným oběhem

kde Q_0 je teplo sušícího média na vstupu do výměníku, Q_{in} je teplo ohřívací látky na vstupu do výměníku, Q_1 je teplo sušícího média na výstupu z výměníku, Q_{out} je teplo ohřívací látky na výstupu z výměníku, Q_{z1} jsou tepelné ztráty výměníku, Q_{z2} jsou tepelné ztráty sušárny, $Q_{vyp.vody}$ je teplo na odpaření vody z materiálu neboli skupenské teplo, Q_{os} je teplo na ohřev sušárny, Q_{om} je teplo na ohřev materiálu, Q_2 je teplo na výstupu ze sušárny

Tepelná bilance výměníku tepla

$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_{in} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{z1} \quad (5.7)$$

Tepelná bilance sušárny

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} \quad (5.8)$$

Teplo spotřebované v sušárně na odpaření 1 kg vody

$$Q_{vyp} = Q_{z2} + Q_{os} + Q_{om} + Q_{vyp.vody} \quad (5.9)$$

Tepelná energie proudícího vzduchu

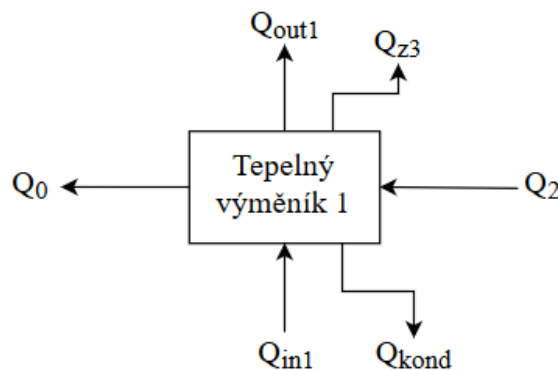
$$\dot{Q} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz} \quad (5.10)$$

Tepelná bilance je v komorové sušárně s uzavřeným oběhem podobná jako s otevřeným oběhem. Navíc je přidán druhý tepelný výměník obr. 22. V něm dochází k ochlazení proudícího teplého vzduchu a kondenzaci vodní páry. Při kondenzaci se uvolní skupenské teplo. Množství uvolněného tepla je dáno rovnicí (5.11). Tepelná bilance výměníku 1 je dána rovnicí (5.12)

Teplo uvolněné při kondenzaci určitého množství vody

$$\dot{Q}_k = \dot{W}_2 \cdot Q_{vyp.vody} \quad (5.11)$$

kde \dot{Q}_k je teplo uvolněné při kondenzaci vodní páry za 1 sekundu, \dot{W}_2 je hmotnostní průtok zkondenzované vody, $Q_{vyp.vody}$ je skupenské teplo vody



Obr. 22 Schéma tepelného výměníku – chladiče

kde Q_0 je teplo sušícího média na výstupu z výměníku 1, Q_2 je teplo sušícího média na vstupu do výměníku 1, Q_{in1} je teplo ochlazovací látky na vstupu do výměníku 1, Q_{out1} je teplo ochlazovací látky na výstupu z výměníku 1, Q_{z3} jsou tepelné ztráty výměníku, Q_{kond} je tepelná energie kondenzátu

Tepelná bilance výměníku tepla – chladiče

$$\dot{Q}_2 + \dot{Q}_{in1} = \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{out1} + \dot{Q}_{z3} + \dot{Q}_{kond} \quad (5.12)$$

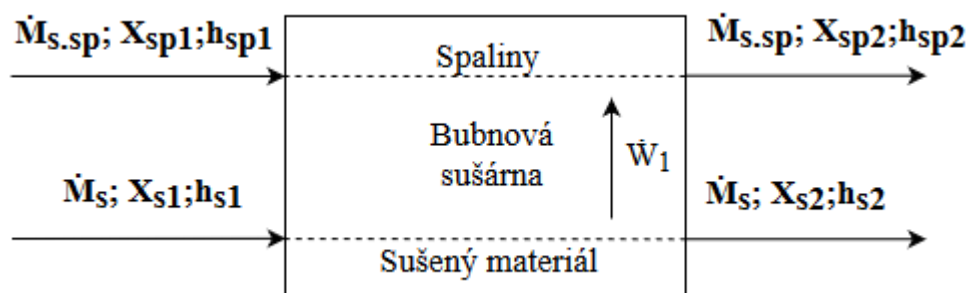
5.2 Kontinuálně pracující sušárna

Jedná se o typ sušárny, ve které se nepřetržitě mění sušený materiál. Nejpoužívanější jsou pásová a bubnová sušárna. Podle typu sušárny se využívají různé druhy sušících médií. Více o sušárnách a použitých médiích je uvedeno v kapitole 3.

5.2.1 Látková bilance

Látková bilance u kontinuálních sušáren se mírně liší oproti periodickým, protože současně dochází k odstranění vysušeného a přivedení vlhkého materiálu. Podobně jako u periodické sušárny, tak i u tohoto typu platí podmínky $X_{vz1} < X_{vz2}$ a $X_{s1} > X_{s2}$. Na obr. 23 je znázorněna bubnová sušárna s důležitými parametry látek, které vstupují a vystupují ze sušárny. Tato sušárna může pracovat s horkým vzduchem nebo spaliny, případně jejich kombinací. Na obrázku níže je uvedeno sušící médium spaliny. Množství vstupující a vystupující vody

ze sušárny se rovná a je to patrné z rovnice (5.13). Množství odpařené vody lze stanovit z rovnice (5.14).



Obr. 23 Schéma bubnové sušárny

kde \dot{W}_1 je hmotnostní průtok odpařené vody, $\dot{m}_{s.sp}$ je hmotnostní průtok suchých spalin, X_{sp} je měrná vlhkost spalin, h_{sp} je entalpie vlhkých spalin vztažená na kilogram suchých spalin, \dot{m}_s je hmotnostní průtok sušiny, X_s je měrná vlhkost sušiny, h_s je entalpie sušiny, index 1 je vstup do sušárny a index 2 výstup ze sušárny

Bilance vody v sušárně

$$\dot{m}_{s.sp} \cdot X_{sp1} + \dot{m}_s \cdot X_{s1} = \dot{m}_{s.sp} \cdot X_{sp2} + \dot{m}_s \cdot X_{s2} \quad (5.13)$$

Hmotnostní průtok odpařené vody

$$\dot{W} = \dot{m}_{s.sp} \cdot (X_{sp2} - X_{sp1}) = \dot{m}_s \cdot (X_{s1} - X_{s2}) \quad (5.14)$$

5.2.2 Tepelná bilance

Tepelná bilance kontinuální sušárny je podobná jako u periodické sušárny. Rovnice tepelné bilance a další potřebné rovnice jsou uvedeny níže.

Tepelná bilance sušárny

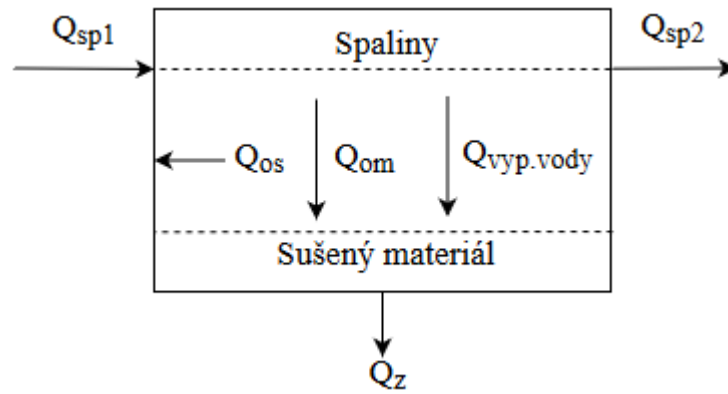
$$\dot{Q}_{sp1} = \dot{Q}_{sp2} + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} \quad (5.15)$$

Teplo spotřebované v sušárně na odpaření 1 kg vody

$$Q_{vyp} = Q_{z2} + Q_{os} + Q_{om} + Q_{vyp.vody} \quad (5.16)$$

Tepelná energie proudících spalin

$$\dot{Q} = \dot{m}_{s.sp} \cdot h_{sp} \quad (5.17)$$



Obr. 24 Schéma bubnové sušárny

kde Q_{sp1} je teplo spalin na vstupu do sušárny, Q_{sp2} je teplo spalin na výstupu ze sušárny, Q_z jsou tepelné ztráty, $Q_{vyp.vody}$ je skupenské teplo vody, Q_{os} je teplo na ohřev sušárny, Q_{om} je teplo na ohřev materiálu

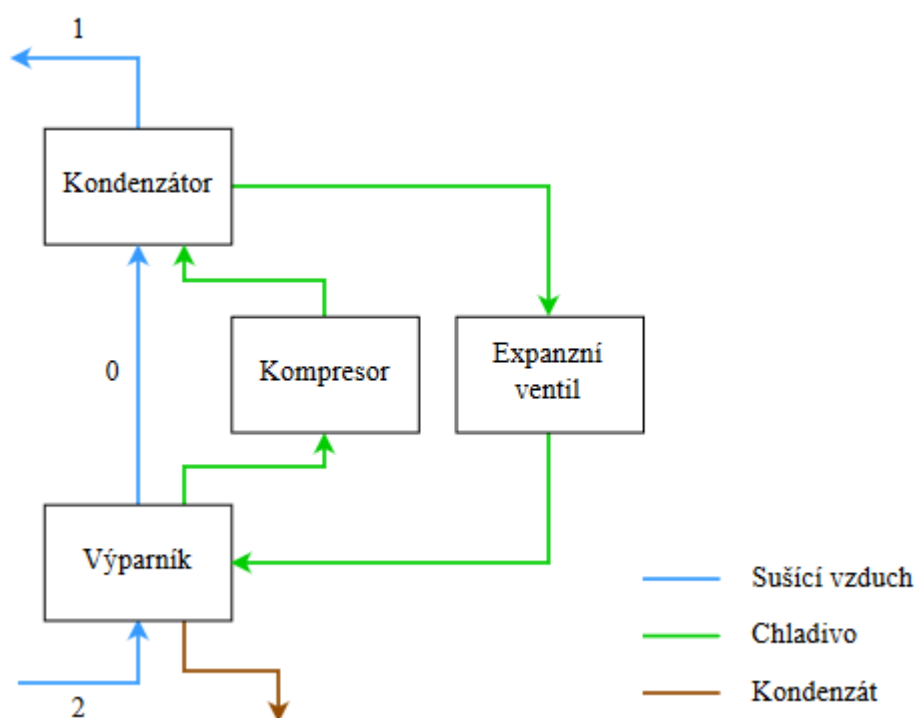
Ke vzniku páté kapitoly byl využit zdroj [17].

6 Parametry proudícího média v komorové sušárně

Před samotným návrhem tepelného výměníku je zapotřebí určit vstupní a výstupní parametry proudícího média. Proto tato kapitola bude zaměřena na sušárnu jako celek, nejedná se již o teoretickou část. Pro sušení materiálu je zvolena komorová sušárna. Ta slouží k odstranění vody z materiálu, nejčastěji z dřevěných desek. Využívá schopnost sušícího média a tou je možnost pojmout určitou část vlhkosti. Sušící médium s obsaženou vlhkostí u otevřeného oběhu je vypouštěno ven ze sušárny. V případě oběhu uzavřeného se vodní pára odstraní kondenzací a následným oddělením z proudu sušícího média. Důvod kondenzace je popsán v kapitole 5.1.

6.1 Odstranění vody z proudícího vzduchu

K odstranění vlhkosti a ohřevu sušícího média je zvoleno tepelné čerpadlo (kapitola 4.3 je zaměřená na tepelná čerpadla). Důvodem vybrání tohoto typu zařízení je možnost zpětně získat část tepelné energie, která se spotřebovala na odpaření vody. Ve výparníku se totiž uvolní teplo, to je dáno rovnicí (5.11). Tepelné čerpadlo potřebuje ke své činnosti elektrickou energii. Tu lze odebrat z elektrické sítě nebo ji přímo vyrobit v některém ze zařízení, které vyrábí elektřinu. Obrázek 25 znázorňuje tepelné čerpadlo, které je zapojeno jako odlučovač vlhkosti.

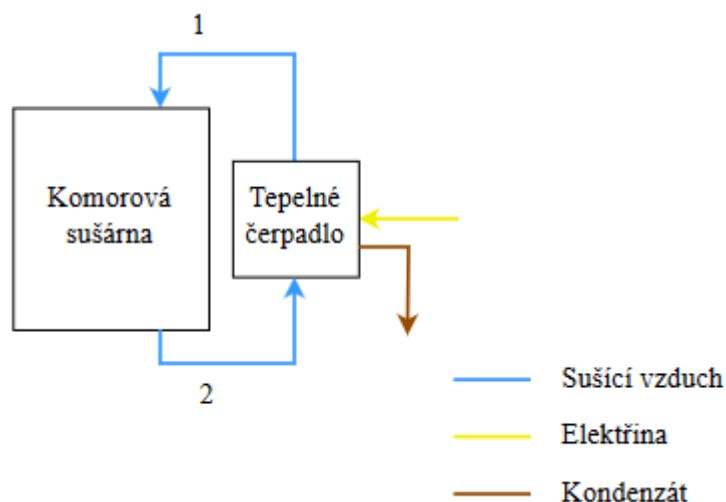


Obr. 25 Schéma tepelného čerpadla

6.2 Komorová sušárna s tepelným čerpadlem

Před určením bilancí v komorové sušárně je nejprve nutné stanovit parametry vzduchu. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, komorová sušárna pracuje s tlakem blízkým atmosférickému (101 325 Pa) a právě tento tlak bude využit pro stanovení parametrů vzduchu. Nejprve

se stanoví vzduch za výparníkem. V něm dojde k poklesu teploty a tím se vzduch stane přesycený. Vzniknout kapičky vody, které je nutno odloučit. Pokud se odstraní všechny vzniklé kapičky ve výparníku, bude proudící vzduch za výparníkem v nasyceném stavu. Teplota za výparníkem závisí na množství odebrané tepelné energie ve výparníku, a tak může být tato teplota do značné míry ovlivněna. Teplota v komorové sušárně se může pohybovat od 50 do 150 °C (kapitola 3.1). Tepelná čerpadla nepracují příliš s vysokými teplotami, protože jejich provoz by byl neekonomický. Proto je zvolena teplota vzduchu na výstupu výparníku 45 °C. K tomu budou vhodně zvoleny ostatní teploty. Obr. 26 znázorňuje komorovou sušárnu, ke které je připojeno tepelné čerpadlo.



Obr. 26 Schéma komorové sušárny a tepelného čerpadla

Parametry vzduchu za výparníkem

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz0} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\varphi_{vz0} = 100 \%$

Pomocí těchto třech hodnot lze určit zbylé parametry vzduchu (6.1) využitím výpočtového programu [7].

$$X_{vz0}; \rho_{vz0}; \Phi_{vz0}; h_{vz0} = f(p; t_{vz0}; \varphi_{vz0}) \quad (6.1)$$

- $X_{vz0} = 0,06516 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$
- $\rho_{vz0} = 1,066 \frac{\text{kg}_{\text{v.vz}}}{\text{m}^3}$
- $\Phi_{vz0} = 0,06524 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{m}^3}$
- $h_{vz0} = 213,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Ve výparníku se předá tepelná energie chladivu a vlivem toho dojde k jeho vypaření. Následně chladivo projde kompresorem. Zde se zvýší jeho teplota a tlak. Nakonec ohřáté chladivo předá tepelnou energii proudícímu vzduchu v kondenzátoru. Množství předaného

tepla v kondenzátoru může být ovlivněno změnou výkonu kompresoru. Pomocí toho může být změněna teplota vzduchu na výstupu z kondenzátoru. Ta je zvolena tak, aby předané teplo v kondenzátoru bylo větší než odebrané teplo ve výparníku. Dále za výparníkem se množství vody ve vzduchu nemění. Změna nastává až v sušárně při odpaření. Tzn., že měrná vlhkost za výparníkem a kondenzátorem je stejná. Podle toho se určí potřebné **parametry vzduchu za kondenzátorem**.

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz1} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
- $X_{vz1} = X_{vz0} = 0,06516 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Opět pomocí těchto hodnot se stanoví další parametry (6.2) [7].

$$\varphi_{vz1}; \rho_{vz1}; \Phi_{vz1}; h_{vz1} = f(p; t_{vz1}; X_{vz1}) \quad (6.2)$$

- $\varphi_{vz1} = 48,13 \%$
- $\rho_{vz1} = 1,018 \frac{\text{kg}_{\text{s.vz}}}{\text{m}^3}$
- $\Phi_{vz1} = 0,0623 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{m}^3}$
- $h_{vz1} = 230,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Pro určení parametrů vzduchu na výstupu ze sušárny bude zapotřebí stanovit množství předaného tepla v sušárně a hmotnostní průtok vzduchu. Od sušárny je požadováno odpaření **100 kg vody za hodinu**. Výparné teplo vody se pohybuje kolem $2,257 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Spotřebované teplo na odpaření 1 kg vody v sušárně se liší od výparného tepla samotné vody. Jelikož je nutné do spotřebovaného tepla započítat i další hodnoty, jako je teplo na ohřev sušárny, ohřev sušeného materiálu, ztráty sušárny apod. Například pro Douglasku tisolistou se spotřebované teplo na odpaření 1 kg vody v komorové sušárně pohybuje v rozmezí $6,048 - 6,978 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ [14]. Pro výpočet bude uvažována přibližně průměrná hodnota z těchto dvou hodnot a ta se rovná $6,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Množství předaného tepla a hmotnostní průtok vzduchu v sušárně se dá určit pomocí kalorimetrické rovnice (4.1). Dosazením spotřebovaného tepla na odpaření 1 kg vody a množství odpařené vody za sekundu, se získá rovnice ve tvaru (6.3). Z této rovnice se vypočítá množství vlhkého vzduchu, který proudí skrze sušárnu a tepelné čerpadlo. Bohužel v rovnici je další neznámá a to ΔT . Tato hodnota je tvořena rozdílem teplot na vstupu a výstupu ze sušárny. Parametry na vstupu do sušárny jsou známy. Nejsou určeny jen parametry vzduchu na výstupu sušárny. Pokud bude rozdíl teplot velmi malý, bude průtok vzduchu velký. Na druhou stranu, je-li rozdíl teplot větší, sníží se tím potřebný průtok sušícího vzduchu. Jestliže je teplota na výstupu příliš nízká, mohlo být dojit k přesycení vzduchu a tím by došlo ke kondenzaci vody v samotné sušárně. Tento případ je pro sušárnu nežádoucí. Proto bude volena teplota na výstupu ze sušárny tak, aby průtok vzduchu byl pokud možno optimální a zároveň nedošlo ke kondenzaci vody v sušárně. Teplota na výstupu je zvolena $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Měrná tepelná kapacita

vzduchu je $1,007 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ [39]. Po dosazení těchto hodnot do rovnice (6.3) se vypočítá množství proudícího vlhkého vzduchu.

$$\dot{W}_1 \cdot Q_{vyp} = \dot{m}_{v.vz} \cdot c \cdot \Delta T \quad (6.3)$$

$$\frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} = \dot{m}_{v.vz} \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\dot{m}_{v.vz} = \frac{n \cdot Q_{vyp}}{3600 \cdot c \cdot \Delta T} = \frac{100 \cdot 6500}{3600 \cdot 1,007 \cdot (60 - 50)} = 17,93 \frac{kg_{v.vz}}{s}$$

kde \dot{W}_1 je množství odpařené vody, $\dot{m}_{v.vz}$ je hmotnostní průtok vlhkého vzduchu, n je počet kilogramů odpařené vody za hodinu, Q_{vyp} je množství tepelné energie k odpaření 1 kg vody ze dřeva, c je měrná tepelná kapacita vzduchu, ΔT je teplotní diference (rozdíl teplot na vstupu a výstupu sušárny)

Pro určení parametrů vzduchu na výstupu jsou zatím známé dvě hodnoty, tlak a teplota. Aby se mohli určit zbylé hodnoty, je potřeba zjistit ještě jednu hodnotu. Ta může být určena podle rovnic (5.1) a (5.4). Jestliže se z obou rovnic vyjádří hmotnostní průtok suchého vzduchu, může být jedna z rovnic dosazena do druhé (6.4). Tímto způsobem se určí měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze sušárny.

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{s.vz} \quad (6.4)$$

$$\dot{m}_{v.vz} - \dot{W} = \frac{\dot{W}_1}{(X_{vz2} - X_{vz1})}$$

$$\dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_1} \cdot \Phi_1 = \frac{\frac{n}{3600}}{(X_{vz2} - X_{vz1})}$$

$$X_{vz2} = \frac{\frac{n}{3600}}{(\dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_1} \cdot \Phi_1)} + X_{vz1} = \frac{\frac{100}{3600}}{(17,93 - \frac{17,93}{1,018} \cdot 0,0623)} + 0,06516 = 0,06681 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$$

Parametry vzduchu na výstupu ze sušárny

- $p = 101325 Pa$
- $t_{vz2} = 50 \text{ } ^\circ C$
- $X_{vz2} = 0,06681 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$

Pomocí těchto hodnot se stanoví další parametry vzduchu (6.5) [7].

$$\varphi_{vz2}; \rho_{vz2}; \Phi_{vz2}; h_{vz2} = f(p; t_{vz2}; X_{vz2}) \quad (6.5)$$

- $\varphi_{vz2} = 79,48 \%$
- $\rho_{vz2} = 1,049 \frac{kg_{v.vz}}{m^3}$
- $\Phi_{vz2} = 0,0657 \frac{kg_{vody}}{m^3}$
- $h_{vz2} = 223,8 \frac{kJ}{kg_{s.vz}}$

Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně pro dané parametry vzduchu je dán rovnicí (6.6). Ta vychází z rovnice (5.1).

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_1} \cdot \Phi_1 = 17,93 - \frac{17,93}{1,018} \cdot 0,0623 = 16,83 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.6)$$

6.2.1 Bilance vody

Bilance vody v sušárně i ve výparníku je dána množstvím proudícího vzduchu a jeho vlastnostmi. Rovnice (5.3) znázorňuje bilanci vody v sušárně s využitím hmotnostního průtoku suchého vzduchu. Rozdělením rovnice se určí množství přiváděné a odváděné vody. To je znázorněno rovnicemi (6.7) a (6.8). Výsledné hodnoty by se měli rovnat a v tomto případě se rovnají. **Bilance vody v komorové sušárně.**

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz1} + \dot{W}_1 = 16,83 \cdot 0,06516 + \frac{100}{3600} = 1,12 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.7)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz2} = 16,83 \cdot 0,06681 = 1,12 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.8)$$

Bilance vody v sušárně může být určena i jiným způsobem (6.9) a (6.10). Opět platí, že hodnoty se musí rovnat a současně se musí rovnat s předchozími hodnotami.

$$\frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{vz1}} \cdot \Phi_{vz1} + \dot{W}_1 = \frac{17,93}{1,018} \cdot 0,0623 + \frac{100}{3600} = 1,13 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.9)$$

$$\frac{\dot{m}_{v.vz} + \dot{W}_1}{\rho_{vz2}} \cdot \Phi_{vz2} = \frac{17,93 + \frac{100}{3600}}{1,049} \cdot 0,0657 = 1,12 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.10)$$

Celý cyklus by měl být v rovnováze. Proto je potřeba zajistit rovnováhu mezi množstvím odpařené a zkondenzované vody. Hodnoty jednotlivých rovnic (6.11) a (6.12) musí být totožné s předchozími výsledky. **Bilance vody ve výparníku.**

$$\frac{\dot{m}_{v.vz} + \dot{W}_1}{\rho_{vz2}} \cdot \Phi_{vz2} = \frac{17,93 + \frac{100}{3600}}{1,049} \cdot 0,0657 = 1,12 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.11)$$

$$\frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{vz0}} \cdot \Phi_{vz0} + \dot{W}_2 = \frac{17,93}{1,066} \cdot 0,06524 + \frac{100}{3600} = 1,13 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.12)$$

Výsledné hodnoty jsou téměř všech totožné. Vzniklá odchylka je dána zaokrouhlováním. Lze usoudit, že zvolené a vypočtené parametry vzduchu jsou správné.

6.2.2 Tepelná bilance

Tepelná bilance komorové sušárny je dána rovnicí (6.13). Využitím této rovnice a rozdělení na vstupující a vystupující teplo vzniknou rovnice (6.14) a (6.15). Výsledné hodnoty obou dvou rovnic jsou stejné.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} \quad (6.13)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} = 16,83 \cdot 230,8 = 3884,4 \text{ kW} \quad (6.14)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} = \quad (6.15)$$

$$= 16,83 \cdot 223,8 + \frac{100}{3600} \cdot 6500 - \frac{100}{3600} \cdot 2257 = 3884,4 \text{ kW}$$

Ve výparníku dochází ke kondenzaci vody a část tepelné energie odchází společně s kondenzátem. Entalpie kondenzátu pro daný případ je vypočtena v rovnici (6.16). Teplota kondenzátu je volena z průměru teplot vzduchu na vstupu a výstupu výparníku.

$$h_{kond} = f\left(p; \frac{t_2+t_1}{2}\right) = f(101 \text{ kPa}; 47,5 \text{ }^\circ\text{C}) = 199 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (6.16)$$

Chladivo ve výparníku odebírá proudícímu vzduchu tepelnou energii. Sníží se teplota vzduchu a jeho maximální obsah vody. Následně dojde k oddělení kapiček vody od proudícího vzduchu. Aby došlo ke kondenzaci požadovaného množství vody, je potřeba zajistit odebrání daného množství tepelné energie z proudícího vzduchu. Pro všechny výpočty budou uvažovány ztráty $\dot{Q}_z = 0$. Jelikož se všechny tepelné výměníky nacházejí uvnitř komplexu a uvolněná energie ve formě ztrát do okolí, ohřívá prostory sušárny a tím snižuje Q_{vyp} . **Množství odebrané energie ve výparníku** je dáno rovnicí (6.17). Ta vychází z rovnice (5.12).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1} &= \dot{Q}_0 - \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{z1} + \dot{Q}_{kond} = \\ &= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \dot{m}_{kond} \cdot h_{kond} = \\ &= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} = \\ &= 16,83 \cdot 213,8 - 16,83 \cdot 223,8 + 0 + \frac{100}{3600} \cdot 199 = -162,8 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Kondenzátor slouží k předání tepelné energie proudícímu vzduchu. Využívá k tomu tepelnou energii odevzdanou ve výparníku a teplo „přivedené“ kompresorem. Pro ohřátí vzduchu na dané parametry, je potřeba v kondenzátoru předat proudícímu vzduchu tepelnou energii. **Množství předané tepelné energie v kondenzátoru** se určí podle rovnice (6.18). Vychází rovnicí (5.7).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{in2} &= \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{out2} + \dot{Q}_{z2} \\ \dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2} &= \dot{Q}_1 - \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{z2} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} + \dot{Q}_{z2} = \\ &= 16,83 \cdot 230,8 - 16,83 \cdot 213,8 + 0 = 286,1 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.18)$$

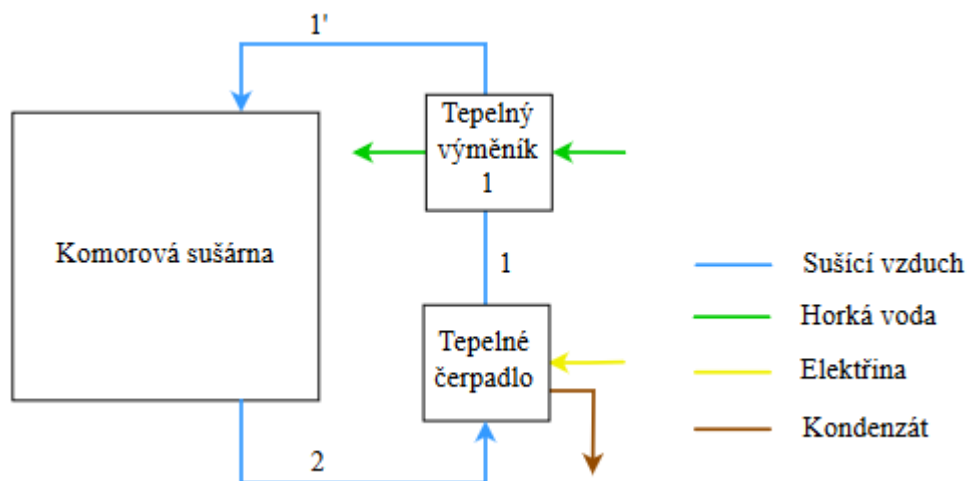
Množství spotřebované tepelné energie pro odpaření vody v komorové sušárně se rovná tepelné energii předané v kondenzátoru, odebrané ve výparníku, uvolněnému skupenskému teplu a teplu odvedeném kondenzátem. Výsledné hodnoty rovnic (6.19) a (6.20) by se měli téměř rovnat, záleží na zaokrouhlování jednotlivých dosazených hodnot.

$$\dot{W}_1 \cdot Q_{vyp} = \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} = \frac{100}{3600} \cdot 6500 = 180,6 \text{ kW} \quad (6.19)$$

$$\begin{aligned} (\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}) + (\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2}) + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} - \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} &= \\ = -162,8 + 286,1 + \frac{100}{3600} \cdot 2257 - \frac{100}{3600} \cdot 199 &= 180,5 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.20)$$

6.3 Zvýšení teploty sušícího média

Pro zvýšení teploty sušícího vzduchu, může být za tepelné čerpadlo umístěn tepelný výměník nebo skupina tepelných výměníků obr. 27. Rovnice (5.7) znázorňuje tepelnou bilanci pro použité tepelné výměníky, neboli udává teplo, které vstupuje a vystupuje z tepelného výměníku.



Obr. 27 Schéma komorové sušárny s tepelným čerpadlem a tepelným výměníkem

Parametry vzduchu na výstupu z výparníku a kondenzátoru tepelného čerpadla zůstávají stejné. Při použití tepelného výměníku se zvýší teplota na vstupu do komory. Je-li zároveň zachována teplota vzduchu na výstupu ze sušárny, dojde k snížení potřebného množství proudícího vzduchu z důvodu zvýšení ΔT . Spotřebované teplo na odpaření 1 kg vody v komorové sušárně je stejné pro oba dva případy.

Parametry vzduchu na výstupu z tepelného výměníku 1

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz1'} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- $X_{vz1'} = X_{vz1} = 0,06516 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Pomocí výpočtového programu byly stanoveny další parametry (6.21) [7].

$$\varphi_{vz1'}; \rho_{vz1'}; \Phi_{vz1'}; h_{vz1'} = f(p; t_{vz1'}; X_{vz1'}) \quad (6.21)$$

- $\varphi_{vz1'} = 30,76 \%$
- $\rho_{vz1'} = 0,9887 \frac{\text{kg}_{\text{v.vz}}}{\text{m}^3}$
- $\Phi_{vz1'} = 0,06048 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{m}^3}$
- $h_{vz1'} = 242,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Množství proudícího vlhkého vzduchu

$$\dot{m}_{v.vz} = \frac{n \cdot Q_{vyp}}{3600 \cdot c \cdot \Delta T} = \frac{100 \cdot 6500}{3600 \cdot 1,007 \cdot (70 - 50)} = 8,97 \frac{\text{kg}_{\text{v.vz}}}{\text{s}} \quad (6.22)$$

Měrná vlhkost na výstupu ze sušárny

$$X_{vz2} = \frac{\frac{n}{3600}}{\left(\dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{1'}} \cdot \Phi_{1'}\right)} + X_{vz1'} = \frac{\frac{100}{3600}}{\left(8,97 - \frac{8,97}{0,9887} \cdot 0,06048\right)} + 0,06516 = \quad (6.23)$$

$$= 0,068459 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$$

Parametry vzduchu na výstupu ze sušárny

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- $X_{vz2} = 0,068459 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$

Pomocí těchto hodnot se stanoví další parametry vzduchu (6.24) [7].

$$\varphi_{vz2}; \rho_{vz2}; \Phi_{vz2}; h_{vz2} = f(p; t_{vz2}; X_{vz2}) \quad (6.24)$$

- $\varphi_{vz2} = 81,24 \%$
- $\rho_{vz2} = 1,048 \frac{kg_{v.vz}}{m^3}$
- $\Phi_{vz2} = 0,06715 \frac{kg_{vody}}{m^3}$
- $h_{vz2} = 228 \frac{kJ}{kg_{s.vz}}$

Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně pro dané parametry vzduchu je dán rovnicí (6.25).

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{1'}} \cdot \Phi_{1'} = 8,97 - \frac{8,97}{0,9887} \cdot 0,06048 = 8,42 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.25)$$

6.3.1 Bilance vody

Bilance vody v sušárně i ve výparníku může být vypočtena pomocí stejného postupu jako v předchozím případě.

Bilance vody v komorové sušárně

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz1'} + \dot{W}_1 = 8,42 \cdot 0,06516 + \frac{100}{3600} = 0,58 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.26)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz2} = 8,42 \cdot 0,068459 = 0,58 \frac{kg_{vody}}{s} \quad (6.27)$$

Bilance vody ve výparníku se po dosažení do obou rovnic rovná $0,58 \frac{kg_{vody}}{s}$. Výsledné hodnoty se rovnají. Oproti předchozímu případu množství pohybující se vody je menší. Z důvodu nižšího průtoku vzduchu sušárnou, přičemž množství odpařené a zkondenzované vody je totožné s předchozím případem.

6.3.2 Tepelná bilance

Tepelná bilance komorové sušárny je obdobná jako v předchozím případě, jen došlo k změně hmotnostního průtoku vzduchu a parametrů na vstupu a výstupu sušárny. Výsledné hodnoty se opět mírně liší vlivem zaokrouhlování jednotlivých veličin.

$$\dot{Q}_{1'} = \dot{Q}_2 + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} \quad (6.28)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1'} = 8,42 \cdot 242,1 = 2038,5 \text{ kW} \quad (6.29)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} = \quad (6.30)$$

$$= 8,42 \cdot 228 + \frac{100}{3600} \cdot 6500 - \frac{100}{3600} \cdot 2257 = 2037,6 \text{ kW}$$

Množství odebrané energie ve výparníku je dáno rovnicí (6.31).

$$\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1} = \dot{Q}_0 - \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{z1} + \dot{Q}_{kond} = \quad (6.31)$$

$$= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \dot{m}_{kond} \cdot h_{kond} =$$

$$= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} =$$

$$= 8,42 \cdot 213,8 - 8,42 \cdot 228 + 0 + \frac{100}{3600} \cdot 199 = -114 \text{ kW}$$

Množství předané tepelné energie v kondenzátoru se určí podle rovnice (6.32).

$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_{in2} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{out2} + \dot{Q}_{z2} \quad (6.32)$$

$$\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{z2} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} + \dot{Q}_{z2} =$$

$$= 8,42 \cdot 230,8 - 8,42 \cdot 213,8 + 0 = 143,1 \text{ kW}$$

V **tepelném výměníku 1** dojde k předání tepelné energie proudícímu vzduchu, podobně jako v případě kondenzátoru.

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_{in3} = \dot{Q}_{1'} + \dot{Q}_{out3} + \dot{Q}_{z3} \quad (6.33)$$

$$\dot{Q}_{in3} - \dot{Q}_{out3} = \dot{Q}_{1'} - \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{z3} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1'} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} + \dot{Q}_{z3} =$$

$$= 8,42 \cdot 242,1 - 8,42 \cdot 230,8 + 0 = 95,1 \text{ kW}$$

V tepelném čerpadle se předá proudícímu vzduchu v tomto případě méně tepla. Pro odpaření vody z materiálu je potřeba dodat stejné množství tepelné energie jako u předchozího případu. Zbylou část tepelné energie poskytne tepelný výměník 1. Znovu se musí přibližně rovnat následující rovnice.

$$\dot{W}_1 \cdot Q_{vyp} = \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} = \frac{100}{3600} \cdot 6500 = 180,6 \text{ kW} \quad (6.34)$$

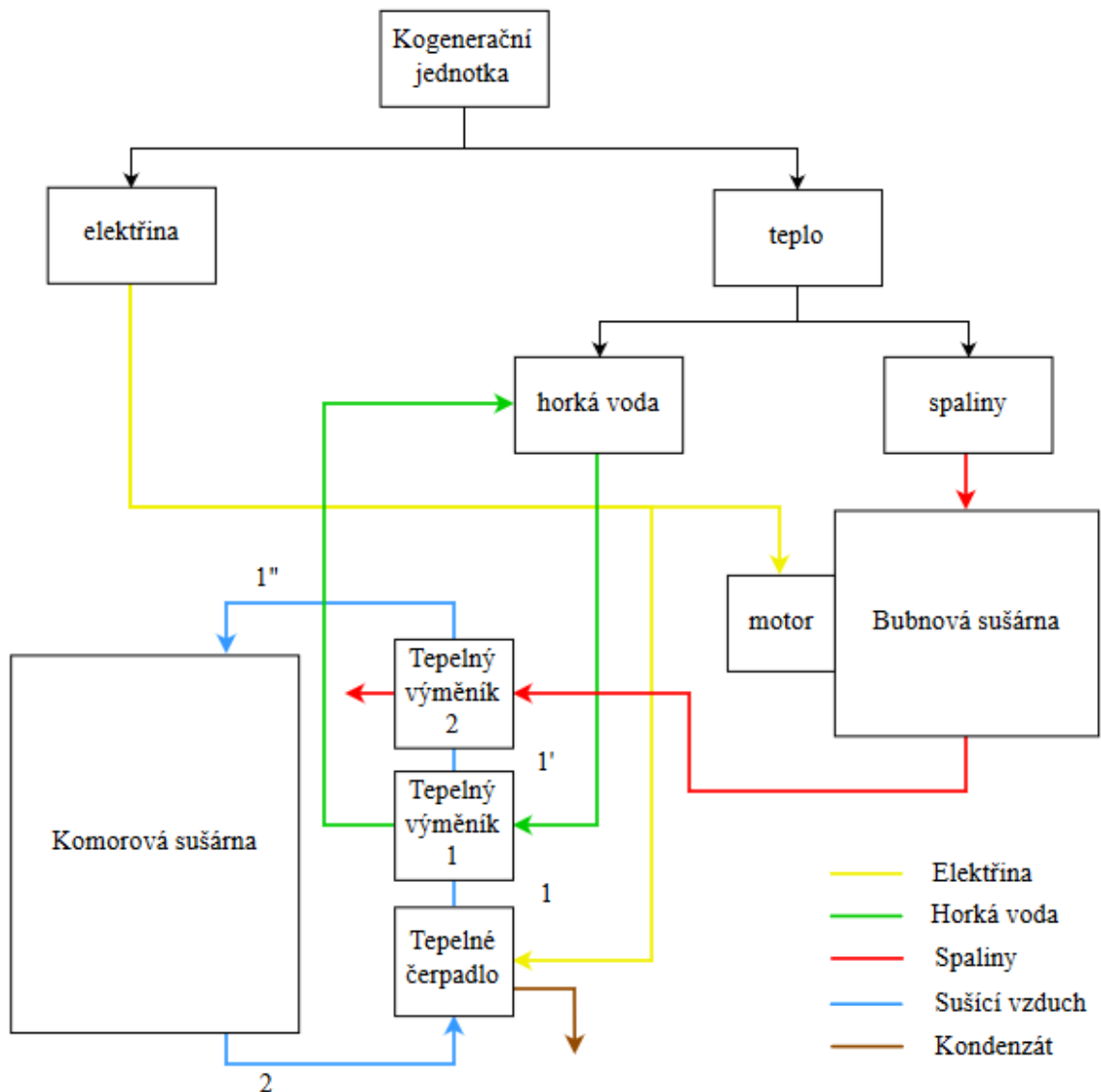
$$(\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}) + (\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2}) + (\dot{Q}_{in3} - \dot{Q}_{out3}) + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} - \quad (6.35)$$

$$-\frac{n}{3600} \cdot h_{kond} = -114 + 143,1 + 95,1 + \frac{100}{3600} \cdot 2257 - \frac{100}{3600} \cdot 199 =$$

$$= 181,4 \text{ kW}$$

6.4 Komorová sušárna v celkovém procesu

Komorová sušárna slouží k sušení dřevěných desek. Při jejich výrobě vzniká velké množství dřevního odpadu. Ten může být využit k výrobě štěpky či pelet pro energetický průmysl. Pro lepší spalování a dosažení vyšší výhřevnosti je štěpka sušena. Často se k tomu využívá bubnová sušárna (kapitola 3.3). Komorová sušárna s tepelným čerpadlem potřebuje ke své činnosti elektrickou energii a bubnová spaliny. Jako zdroj elektřiny a tepla je zvolena kogenerační jednotka (kapitola 4.2), která má obvykle větší využití paliva než oddělená výroba. Obr. 28 znázorňuje celkové zapojení sušáren a zdroje elektřiny a tepla.



Obr. 28 Komorová sušárna společně s bubnovou sušárnou a kogenerační jednotkou

Tepelné čerpadlo, respektive kompresor bude poháněn elektrickou energií vytvořenou v kogenerační jednotce. Voda v kogenerační jednotce slouží jako chladící médium zařízení, jinak by došlo k přehřátí a následnému poškození stroje. Tato horká voda je využita v tepelném výměníku 1. Zde předá tepelnou energii proudícímu vzduchu a vrací se zpět. Vzniklé spaliny proudí bubnovou sušárnou, vlivem toho dojde k odpaření vody ze štěpky a odpařená voda společně se spalinami opouští sušárnu. Jelikož spaliny mají na výstupu ze sušárny sto a výše stupňů, můžou se využít v tepelném výměníku 2. Předají teplo proudícímu vzduchu a jsou následně vypouštěny do okolí. Je nutné podotknout, že při poklesnutí teploty spalin pod určitou mez, dojde ke kondenzaci vodní páry obsažené ve spalinách. Tím se „zvýší rychlost koroze“ – nízkoteplotní koroze. Proto by bylo vhodné povrch výměníku ošetřit nebo zvýšit teplotu spalin na vstupu do výměníku 2.

Parametry vzduchu na výstupu z výparníku tepelného čerpadla zůstanou stejné jako u předchozích dvou případů. Zařazení dvou tepelných výměníků za tepelné čerpadlo dojde k snížení spotřebovaného tepla v kondenzátoru. V kondenzátoru se předá méně tepelné energie, než se odebralo proudícímu vzduchu ve výparníku. To platí při zachování výstupní teploty 60 °C. Aby se využilo všechno předané teplo, je zvolena teplota vzduchu na výstupu z kondenzátoru 65 °C.

Parametry vzduchu za kondenzátorem

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz1} = 65 \text{ °C}$
- $X_{vz1} = 0,06516 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Opět pomocí těchto hodnot se stanoví další parametry (6.36) [7].

$$\varphi_{vz1}; \rho_{vz1}; \Phi_{vz1}; h_{vz1} = f(p; t_{vz1}; X_{vz1}) \quad (6.36)$$

- $\varphi_{vz1} = 38,34 \%$
- $\rho_{vz1} = 1,003 \frac{\text{kg}_{\text{s.vz}}}{\text{m}^3}$
- $\Phi_{vz1} = 0,06138 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{m}^3}$
- $h_{vz1} = 236,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Parametry vzduchu na výstupu z tepelného výměníku 1 jsou stejné jako v předchozím případě. Teplota na vstupu do sušárny s využitím tepelného čerpadla a dvou tepelných výměníků je zvolena 80 °C.

Parametry vzduchu na výstupu z tepelného výměníku 2

- $p = 101325 \text{ Pa}$
- $t_{vz1''} = 80 \text{ °C}$
- $X_{vz1''} = X_{vz1'} = 0,06516 \frac{\text{kg}_{\text{vody}}}{\text{kg}_{\text{s.vz}}}$

Další parametry vzduchu (6.37) [7].

$$\varphi_{vz1''}; \rho_{vz1''}; \Phi_{vz1''}; h_{vz1''} = f(p; t_{vz1''}; X_{vz1''}) \quad (6.37)$$

- $\varphi_{vz1''} = 20,23 \%$
- $\rho_{vz1''} = 0,9607 \frac{kg_{v.vz}}{m^3}$
- $\Phi_{vz1''} = 0,05877 \frac{kg_{vody}}{m^3}$
- $h_{vz1''} = 253,5 \frac{kJ}{kg_{s.vz}}$

Zvýšením vstupní teploty a zachování výstupní teploty ze sušárny se určí množství proudícího vzduchu potřebného pro odpaření daného množství vody.

Množství proudícího vlhkého vzduchu

$$\dot{m}_{v.vz} = \frac{n \cdot Q_{vyp}}{3600 \cdot c \cdot \Delta T} = \frac{100 \cdot 6500}{3600 \cdot 1,007 \cdot (80 - 50)} = 5,98 \frac{kg_{v.vz}}{s} \quad (6.38)$$

Měrná vlhkost na výstupu ze sušárny

$$X_{vz2} = \frac{\frac{n}{3600}}{(\dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_1''} \cdot \Phi_1'')} + X_{vz1''} = \frac{\frac{100}{3600}}{(5,98 - \frac{5,98}{0,9607} \cdot 0,05877)} + 0,06516 =$$

$$= 0,070108 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}} \quad (6.39)$$

Parametry vzduchu na výstupu ze sušárny

- $p = 101325 Pa$
- $t_{vz2} = 50 \text{ } ^\circ C$
- $X_{vz2} = 0,070108 \frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$

Opět pomocí výpočtového programu jsou stanoveny zbylé parametry vzduchu (6.40) [7].

$$\varphi_{vz2}; \rho_{vz2}; \Phi_{vz2}; h_{vz2} = f(p; t_{vz2}; X_{vz2}) \quad (6.40)$$

- $\varphi_{vz2} = 83 \%$
- $\rho_{vz2} = 1,047 \frac{kg_{v.vz}}{m^3}$
- $\Phi_{vz2} = 0,06861 \frac{kg_{vody}}{m^3}$
- $h_{vz2} = 232,3 \frac{kJ}{kg_{s.vz}}$

Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně pro dané parametry vzduchu je dán rovnicí (6.41).

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_1''} \cdot \Phi_1'' = 5,98 - \frac{5,98}{0,9607} \cdot 0,05877 = 5,61 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.41)$$

6.4.1 Bilance vody

Bilance vody v sušárně i ve výparníku může být vypočtena pomocí stejného postupu jako u předchozích dvou případů.

Bilance vody v komorové sušárně

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz1''} + \dot{W}_1 = 5,61 \cdot 0,06516 + \frac{100}{3600} = 0,39 \frac{kgvody}{s} \quad (6.42)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot X_{vz2} = 5,61 \cdot 0,070108 = 0,39 \frac{kgvody}{s} \quad (6.43)$$

Podobně jako v kapitole 6.2.1 může být vypočtena bilance vody ve výparníku. Po dosažení parametrů vzduchu vychází tato bilance $0,39 \frac{kgvody}{s}$. Hodnota odpovídá bilanci vody v komorové sušárně. Množství pohybující se vody v proudícím vzduchu je menší oproti předchozím hodnotám. Důvodem je ještě menší průtok vzduchu sušárnou, přičemž množství odpařené a zkondenzované vody je stejné.

6.4.2 Tepelná bilance

Tepelná bilance komorové sušárny s využitím tepelného čerpadla a dvou tepelných výměníků. Rovnice (6.45) a (6.46) se téměř rovnají. Rozdíl uvedených hodnot je dán vlivem zaokrouhlování dosazených jednotek.

$$\dot{Q}_{1''} = \dot{Q}_2 + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} \quad (6.44)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1''} = 5,61 \cdot 253,5 = 1422,1 \text{ kW} \quad (6.45)$$

$$\dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} - \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} = \quad (6.46)$$

$$= 5,61 \cdot 232,3 + \frac{100}{3600} \cdot 6500 - \frac{100}{3600} \cdot 2257 = 1421,1 \text{ kW}$$

Množství odebrané energie ve výparníku je dáno rovnicí (6.47).

$$\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1} = \dot{Q}_0 - \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{z1} + \dot{Q}_{kond} = \quad (6.47)$$

$$= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \dot{m}_{kond} \cdot h_{kond} =$$

$$= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} =$$

$$= 5,61 \cdot 213,8 - 5,61 \cdot 232,3 + 0 + \frac{100}{3600} \cdot 199 = -98,3 \text{ kW}$$

Množství předané tepelné energie v kondenzátoru se určí podle rovnice (6.48)

$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_{in2} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{out2} + \dot{Q}_{z2} \quad (6.48)$$

$$\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{z2} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} + \dot{Q}_{z2} =$$

$$= 5,61 \cdot 236,5 - 5,61 \cdot 213,8 + 0 = 127,4 \text{ kW}$$

V **tepelném výměníku 1** dojde k předání tepelné energie proudícímu vzduchu, podobně jako v případě kondenzátoru.

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_{in3} = \dot{Q}_{1'} + \dot{Q}_{out3} + \dot{Q}_{z3} \quad (6.49)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in3} - \dot{Q}_{out3} &= \dot{Q}_{1'} - \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{z3} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1'} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1} + \dot{Q}_{z3} = \\ &= 5,61 \cdot 242,1 - 5,61 \cdot 236,5 + 0 = 31,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

Předaná tepelná energie proudícímu vzduchu v **tepelném výměníku 2**.

$$\dot{Q}_{1'} + \dot{Q}_{in4} = \dot{Q}_{1''} + \dot{Q}_{out4} + \dot{Q}_{z4} \quad (6.50)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in4} - \dot{Q}_{out4} &= \dot{Q}_{1''} - \dot{Q}_{1'} + \dot{Q}_{z4} = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1''} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz1'} + \dot{Q}_{z4} = \\ &= 5,61 \cdot 253,5 - 5,61 \cdot 242,1 + 0 = 64 \text{ kW} \end{aligned}$$

Tepelná energie pro odpaření požadovaného množství vody se přibližně rovná tepelné energii dodané proudícímu sušicímu vzduchu.

$$\dot{W}_1 \cdot Q_{vyp} = \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp} = \frac{100}{3600} \cdot 6500 = 180,6 \text{ kW} \quad (6.51)$$

$$(\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}) + (\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2}) + (\dot{Q}_{in3} - \dot{Q}_{out3}) + (\dot{Q}_{in4} - \dot{Q}_{out4}) + \quad (6.52)$$

$$+ \frac{n}{3600} \cdot Q_{vyp.vody} - \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} = -98,3 + 127,4 + 31,4 + 64 +$$

$$+ \frac{100}{3600} \cdot 2257 - \frac{100}{3600} \cdot 199 = 181,7 \text{ kW}$$

6.5 Srovnání otevřeného a uzavřeného oběhu

Tepelná energie potřebná k odpaření vody v komorové sušárně s uzavřeným oběhem je dána množstvím tepelné energie přivedené tepelným čerpadlem a tepla přivedeného ve výměnících. Potřebné teplo je sníženo o tepelnou energii odebranou vzduchu ve výparníku tepelného čerpadla (získá se zpět část energie na odpaření vody ze dřeva). Pro všechny tři zmíněné návrhy platí stejné množství spotřebované tepelné energie. Výše zmíněné hodnoty se můžou nepatrně lišit z důvodu zaokrouhlování dosazovaných hodnot. Následující rovnice (6.53) platí pro tepelné čerpadlo se dvěma výměníky tepla.

$$\dot{Q}_{u.oběh} = (\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}) + (\dot{Q}_{in2} - \dot{Q}_{out2}) + (\dot{Q}_{in3} - \dot{Q}_{out3}) + (\dot{Q}_{in4} - \dot{Q}_{out4}) = \quad (6.53)$$

$$= -98,3 + 127,4 + 31,4 + 64 = 124,5 \text{ kW}$$

Množství tepelné energie, kterou je potřeba předat proudícímu vzduchu pro odpaření vody v komorové sušárně s otevřeným oběhem velmi záleží na teplotě okolního vzduchu a jeho parametrech. Pro názornost bude množství tepelné energie, kterou je potřeba předat vzduchu, vypočteno pro zimní, jarní a letní období. Parametry okolního vzduchu pro danou část období a určitou oblast, jsou uvedeny v následujících tabulkách 6-1 až 6-3. K získání parametrů vzduchu byla využita databáze počasí nacházející se na internetu [40]. V tabulkách

jsou uvedeny parametry vzduchu na vstupu a výstupu sušárny. Pro jejich stanovení byly využity předchozí postupy. Teploty na vstupu a výstupu sušárny jsou totožné jako v kapitole 6.4. Množství proudícího vlhkého vzduchu do sušárny je opět stejné $5,98 \frac{kg_{v.vz}}{s}$. Aby bylo možno porovnat tepelnou energii otevřeného a uzavřeného oběhu, je potřeba dodržet i požadované množství odpařené vody a spotřebované teplo na odpaření jednoho kilogramu vody v komorové sušárně.

Tab. 6-1 Zimní období - průměrné hodnoty okolí 1.12.2017 - 1.1.2018

Název veličiny	Okolí	Vstup	Výstup	Jednotka
Tlak	98,4	98,4	98,4	kPa
Teplota	2,7	80	50	°C
Relativní vlhkost	89,5	1,43	11,34	%
Měrná vlhkost	0,00429	0,00429	0,00896	kg _{vody} /kg _{s.vz}
Měrná hmotnost - hustota	1,24	0,9683	1,055	kg _{v.vz} /m ³
Absolutní vlhkost	0,00528	0,00414	0,00937	kg _{vody} /m ³
Entalpie vlhkého vzduchu	13,5	92,18	73,74	kJ/kg _{s.vz}

Jelikož se mění množství vody obsažené ve vzduchu během ročního období, bude potřeba stanovit pro každé období množství suchého vzduchu. **Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně** s otevřeným oběhem pro zimní období je dáno rovnicí (6.54). Teplo potřebné předat vzduchu ve výměníku tepla je vyjádřeno rovnicí (6.55). Rovnice (6.56) udává množství tepelné energie, kterou je potřeba navíc dodat na odpaření kilogramu vody oproti uzavřenému oběhu.

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{okolí}} \cdot \Phi_{okolí} = 5,98 - \frac{5,98}{1,24} \cdot 0,00528 = 5,95 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.54)$$

$$\dot{Q}_{o.oběh} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{vstup} - \dot{Q}_{okolí} + \dot{Q}_z = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vstup} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{okolí} + \quad (6.55)$$

$$+ \dot{Q}_z = 5,95 \cdot 92,18 - 5,95 \cdot 13,5 + 0 = 468,1 \text{ kW}$$

$$\frac{\dot{Q}_{o.oběh}}{\dot{Q}_{u.oběh}} = \frac{468,1}{124,5} = 3,76 \quad (6.56)$$

Tab. 6-2 Jarní období – průměrné hodnoty okolí 1.4.2018 - 1.5.2018

Název veličiny	Okolí	Vstup	Výstup	Jednotka
Tlak	98,4	98,4	98,4	kPa
Teplota	14,9	80	50	°C
Relativní vlhkost	65,4	2,27	14,57	%
Měrná vlhkost	0,00688	0,00688	0,01156	kg _{vody} /kg _{s.vz}
Měrná hmotnost - hustota	1,19	0,9668	1,054	kg _{v.vz} /m ³
Absolutní vlhkost	0,00808	0,0066	0,01204	kg _{vody} /m ³
Entalpie vlhkého vzduchu	32,4	99	80,49	kJ/kg _{s.vz}

Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně s otevřeným oběhem pro jarní období

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{okolí}} \cdot \Phi_{okolí} = 5,98 - \frac{5,98}{1,19} \cdot 0,00808 = 5,94 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.57)$$

Teplu potřebné předat vzduchu ve výměníku tepla

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{o.oběh} &= \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{vstup} - \dot{Q}_{okolí} + \dot{Q}_z = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vstup} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{okolí} + \\ &+ \dot{Q}_z = 5,94 \cdot 99 - 5,94 \cdot 32,4 + 0 = 395,6 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.58)$$

Následující rovnice udává o kolik je vyšší **spotřeba tepelné energie** v komorové sušárně s otevřeným oběhem oproti uzavřenému oběhu.

$$\frac{\dot{Q}_{o.oběh}}{\dot{Q}_{u.oběh}} = \frac{395,6}{124,5} = 3,18 \quad (6.59)$$

Tab. 6-3 Letní období - průměrné hodnoty okolí 1.7.2018 - 1.8.2018

Název veličiny	Okolí	Vstup	Výstup	Jednotka
Tlak	99	99	99	kPa
Teplota	22,5	80	50	°C
Relativní vlhkost	58,2	3,19	18,09	%
Měrná vlhkost	0,00964	0,00964	0,01433	kg _{vody} /kg _{s.vz}
Měrná hmotnost - hustota	1,16	0,9711	1,058	kg _{v.vz} /m ³
Absolutní vlhkost	0,011	0,00927	0,01495	kg _{vody} /m ³
Entalpie vlhkého vzduchu	47,19	106,3	87,67	kJ/kg _{s.vz}

Hmotnostní průtok suchého vzduchu v komorové sušárně s otevřeným oběhem pro letní období

$$\dot{m}_{s.vz} = \dot{m}_{v.vz} - \dot{w} = \dot{m}_{v.vz} - \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{okolí}} \cdot \Phi_{okolí} = 5,98 - \frac{5,98}{1,16} \cdot 0,011 = 5,92 \frac{kg_{s.vz}}{s} \quad (6.60)$$

Teplu potřebné předat vzduchu ve výměníku tepla

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{o.oběh} &= \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{vstup} - \dot{Q}_{okolí} + \dot{Q}_z = \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vstup} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{okolí} + \\ &+ \dot{Q}_z = 5,92 \cdot 106,3 - 5,92 \cdot 47,19 + 0 = 349,9 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.61)$$

Spotřeba tepelné energie oproti uzavřenému oběhu

$$\frac{\dot{Q}_{o.oběh}}{\dot{Q}_{u.oběh}} = \frac{349,9}{124,5} = 2,81 \quad (6.62)$$

V otevřeném oběhu je potřeba předat více tepelné energie než v uzavřeném oběhu komorové sušárny. Důvodem je získání části tepelné energie potřebné pro odpaření vody v komorové sušárně a dále se u sušárny s uzavřeným oběhem neztrácí tepelná energie z vypouštěného sušícího vzduchu do okolí. V letní období, je potřeba předat ve výměníku méně tepla, protože vzduch má vyšší teplotní potenciál.

Ke snížení potřebné energie pro odpaření vody v komorové sušárně s otevřeným oběhem může být využita regenerace tepla a vody. Pokud na výstupu ze sušárny bude umístěn tepelný výměník, ve kterém dojde k ochlazení vzduchu o 5 °C a kondenzaci vodní páry. Bude-li toto získané teplo využito na předehřev vzduchu, sníží se potřebná energie.

Tab. 6-4 Letní období - průměrné hodnoty okolí 1.7.2018 - 1.8.2018 + výměník tepla

Název veličiny	Okolí	Vstup	Výstup sušárna	Výstup výměníku	Jednotka
Tlak	99	99	99	99	kPa
Teplota	22,5	80	50	45	°C
Relativní vlhkost	58,2	3,19	18,09	15,78	%
Měrná vlhkost	0,00964	0,00964	0,01433	0,00964	kg _{vody} /kg _{s.vz}
Měrná hmotnost - hustota	1,16	0,9711	1,058	1,078	kg _{v.vz} /m ³
Absolutní vlhkost	0,011	0,00927	0,01495	0,0103	kg _{vody} /m ³
Entalpie vlhkého vzduchu	47,19	106,3	87,67	70,37	kJ/kg _{s.vz}

Množství proudícího suchého vzduchu je stejné s předchozím případem (6.60). Měrná vlhkost vzduchu se stanoví podle rovnice (5.5). Množství zkondenzované vody ve výměníku je 100 kg za hodinu.

Množství odebrané energie ve výměníku je dáno rovnicí (6.63).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1} &= \dot{Q}_0 - \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{z1} + \dot{Q}_{kond} = & (6.63) \\
 &= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \dot{m}_{kond} \cdot h_{kond} = \\
 &= \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz0} - \dot{m}_{s.vz} \cdot h_{vz2} + \dot{Q}_{z1} + \frac{n}{3600} \cdot h_{kond} = \\
 &= 5,92 \cdot 70,37 - 5,92 \cdot 87,67 + 0 + \frac{100}{3600} \cdot 199 = -96,9 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Teplo potřebné předat vzduchu ve výměníku tepla na vstupu sušárny s využitím regenerace.

$$\dot{Q}_{o.oběh.reg} = \dot{Q}_{o.oběh} - |\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}| = 349,9 - 96,9 = 253 \text{ kW} \quad (6.64)$$

Porovnání **spotřebované tepelné energie** v komorové sušárně s otevřeným oběhem a otevřeným oběhem s regenerací tepla a vody.

$$\frac{\dot{Q}_{o.oběh.reg}}{\dot{Q}_{o.oběh}} = \frac{253}{349,9} = 0,72 \quad (6.65)$$

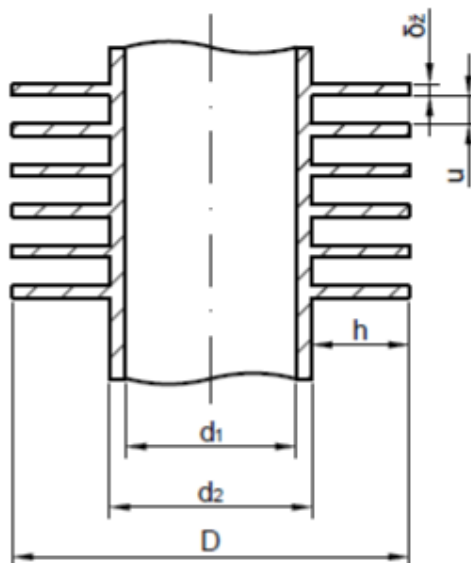
7 Návrh tepelného výměníku

V tepelném výměníku dochází k předávání tepelné energie z jednoho média do druhého. Jelikož zmíněný tepelný výměník, v tomto případě výparník, pracuje se vzduchem o teplotě kolem 50 °C, může být jako chladivo použita voda. Sice se mírně sníží účinnost, ale vzhledem k bezpečnosti je lepší a taky levnější oproti jiným chladivům. Proto v trubkách bude proudit voda, která se vlivem proudícího teplého vzduchu ohřeje a následně vypaří. Aby došlo k odpaření vody za nižší teploty, musí se snížit tlak. Proudící vzduch se při průchodu tepelným výměníkem ochladí a dojde ke kondenzaci odpařené vody v sušárně. Zkondenzovaná kapičky vody proudí se vzduchem a naráží na stěny teplosměnných ploch. Pokud není rychlost proudícího vzduchu příliš vysoká, padají kapičky z teplosměnných ploch směrem dolů do sběrné nádoby. Z ní je voda následně vypouštěna.

7.1 Volba teplosměnné plochy

Tepelné výměníky se rozdělují na dva základní typy rekuperační a regenerační. U rekuperačního výměníku za běžného provozu nedochází k vzájemnému smíchání proudících médií. V případě regeneračního výměníku dochází k vniknutí jednoho média do druhého, převážně to závisí na těsnění mezi jednotlivými proudy. V navrhovaném výměníku bude proudit vzduch a voda, resp. vodní pára. Bylo by nežádoucí, aby se vodní pára dostávala do vzduchu. Proto je zvolen rekuperační výměník. Ten může být tvořen lamelami nebo trubkami. Pro návrh je vybrán výměník s trubkami.

Aby se zvýšila teplosměnná plocha výměníku a tím se zmenšily celkové rozměry tepelného výměníku, jsou často využívány žebra obr. 29. Na jeden metr trubky jich můžou být desítky až stovky. Komerová sušárna pracuje s dřevěnými deskami. Oproti bubnové sušárně (suší se piliny) je v sušicím médiu méně dřevěných malých částic. Proto můžou být jednotlivé žebra výměníku blíže u sebe.



Obr. 29 Žebrovaná trubka

Tabulka 7-1 znázorňuje parametry žebrované trubky. Průměry trubek výparníku tepelného čerpadla bývají kolem jednoho centimetru. Pro tento případ je vybraná trubka s větším průměrem, z důvodu snížení rychlosti vodní páry v potrubí. V trubkách výparníku je snížený tlak, proto je zvolena největší tloušťka stěny trubky pro daný průměr. Při velmi malé tloušťce by totiž mohlo dojít k poškození trubky. Výška a tloušťka žebra je volena úměrně k rozměrům samotné trubky. Počet žeber na jeden metr trubky je voleno tak, aby mohli velmi jemné částice projít skrze výměník. Zároveň čím méně bude žeber na jeden metr, tím budou rozměry celého výměníku větší. Pro odloučení větších částic může být před výparník umístěn cyklón nebo filtr. Další možností je využít změny směru potrubí, kde větší částice mají velkou kinetickou energii a nestačí změnit směr. Vlivem toho narazí na stěnu potrubí a spadnou dolů. Menší částice můžou proletět výměníkem nebo se zde můžou zapříčít. Postupem času dojde k snížení teplosměnné plochy, proto je potřeba tomu předejít a jednou za čas vyčistit výměník, například proudem vody. Materiál potrubí a žeber je volena nerezová ocel. Její tepelná vodivost je zvolena průměrná hodnota.

Tab. 7-1 Parametry žebrované trubky [37], [41]

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr	d_2	0,03	m
Tloušťka stěny	δ_t	0,0025	m
Vnitřní průměr	d_1	0,025	m
Výška žebra	h	0,016	m
Tloušťka žebra	δ_z	0,0015	m
Celkový průměr	D	0,062	m
Počet žeber na 1 m trubky	n_z	160	-
Mezera mezi žebry	u	0,00475	m
Počet mezer na 1 m trubky	r	160	-
Materiál - nerez ocel	λ_m	22,5	W/(m·K)

Plocha žeber na 1 m trubky

$$S_z = n_z \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_2^2) + \pi \cdot D \cdot \delta_z \cdot n_z = 160 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,062^2 - 0,03^2) + \quad (7.1)$$

$$\pi \cdot 0,062 \cdot 0,0015 \cdot 160 \doteq 0,7867 \text{ m}^2$$

Plocha trubky mezi jednotlivými žebry vztažená na 1 m trubky

$$S_t = \pi \cdot r \cdot d_2 \cdot u = \pi \cdot 160 \cdot 0,03 \cdot 0,00475 \doteq 0,0716 \text{ m}^2 \quad (7.2)$$

Celková teplosměnná plocha na žebrované straně výměníku na 1 m trubky

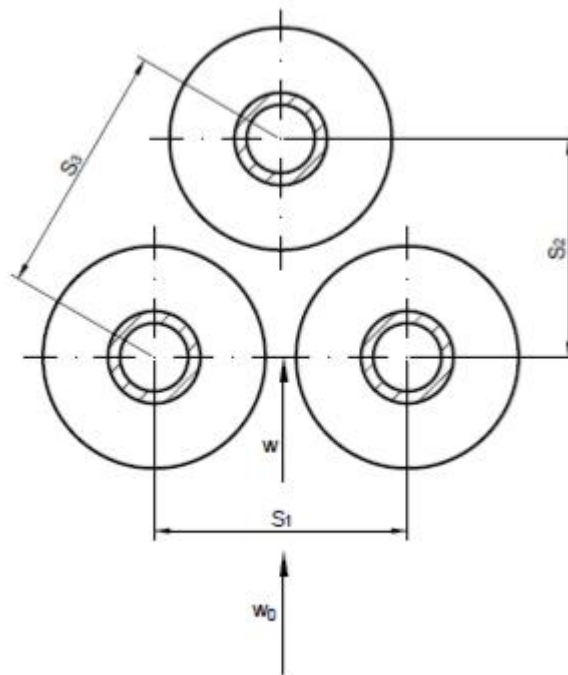
$$S' = S_z + S_t = 0,7867 + 0,0716 = 0,8583 \text{ m}^2 \quad (7.3)$$

Vnitřní teplosměnná plocha trubky vztažená na 1 m trubky

$$S_1 = \pi \cdot d_1 \cdot 1 = \pi \cdot 0,025 \cdot 1 = 0,0785 \text{ m}^2 \quad (7.4)$$

7.2 Uspořádání žebrovek

Jednotlivé trubky s žebry lze umístit za sebe, neboli do čtvercového uspořádání nebo do trojúhelníka obrázek 30. Čtvercové uspořádání je vhodné u abrazivních médií, přičemž první trubky jsou chráněny a další jsou v zákrytu. Trojúhelníkové uspořádání se používá u méně abrazivních médií a současně při tomto uspořádání dochází k snížení celkových rozměrů výměníku. Jak již bylo zmíněno, na teplosměnné plochy naráží kapičky vody. Při uspořádání za sebou by mohli kapičky proletět skrze celý výparník. Jelikož rychlost proudění v komorové sušárně nebude příliš vysoká a množství proudících částic ve vzduchu bude oproti spalinám výrazně nižší. Lze očekávat nízkou abrazi ploch výměníku, proto je vybráno uspořádání do trojúhelníka.



Obr. 30 Vystřídané uspořádání žebrovek

Na výše uvedeném obrázku jsou popsány jednotlivé rozměry trojúhelníkového uspořádání. Směr proudění je naznačen šipkou a jeho velikost je označena w . Kde w_0 je rychlost proudícího vzduchu na vstupu výměníku a w je rychlost v nejužším místě výměníku. S druhou rychlostí bude počítáno níže. Mezera mezi žebry jednotlivých trubek je podobná jako mezera mezi jednotlivými žebry. Snahou je snížit rozměry výměníku.

Tab. 7-2 Vystřídané uspořádání žebrovek

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Mezera mezi žebry jednotlivých trubek v řadě	δ_{mz}	0,005	m
Rozteč 1	s_1	0,067	m
Rozteč 2	s_2	0,070	m
Rozteč 3	s_3	0,0776	m

7.3 Rozměry kanálu a průtočný průřez

Před určením podobnostních čísel je zapotřebí určit rychlost proudění vzduchu, respektive rychlost v nejužším místě tepelného výměníku. Aby se mohla určit rychlost je zapotřebí si nejprve určit průtočný průřez v nejužším místě. K tomu je potřeba znát šířku a délku kanálu. S těmito dvěma rozměry souvisí počet trubek v jedné řadě a počet vrstev (počet řad výměníku). Tyto hodnoty dávají skutečnou plochu výměníku. Aby bylo možné srovnat požadovanou a skutečnou plochu, bylo postupováno následovně:

- zvolila se šířka a délka kanálu
- šířka kanálu musí odpovídat počtu trubek v jedné řadě a počtu mezer
- délka kanálu musí odpovídat počtu žeber a mezer mezi jednotlivými žebry
- v každé vrstvě je stejný počet trubek
- určil se nejmenší průtočný průřez
- určila se skutečná plocha výměníku
- vypočítala se rychlost v nejužším průřezu
- vypočítali se podobnostní čísla
- určil se součinitel prostupu tepla
- vypočítala se potřebná plocha, která se následně porovnála se skutečnou plochou

Pokud se potřebná a skutečná plocha nerovnájí, změní se parametry následovně:

- počet vrstev
- délka kanálu
- šířka kanálu a počet trubek v jedné řadě
- parametry žebrovaných trubek

Nejprve se změní počet vrstev. Pokud by se plochy stále nerovnály, změní se délka kanálu. Jestliže by byla délka příliš dlouhá, bylo potřeba změnit šířku kanálu a počet trubek v řadě. Poslední změnou by bylo použití jiných žebrovaných trubek.

Postupnými změnami došlo k srovnání obou hodnot. Tabulka 7-3 udává potřebné parametry výměníku. Aby nedošlo k velkému průhybu trubek, je uprostřed umístěna přepážka. Ta zajišťuje podporu jednotlivých trubek. Její šířka a vzdálenost od posledních žeber z každé strany jsou uvedeny ve stejné tabulce. Na každé trubce se nachází 336 žeber, tzn. na každé straně přepážky je na jedné trubce 168 žeber.

Tab. 7-3 Parametry výměníku

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Šířka přepážky	δ_p	0,005	m
Vzdálenost posledního žebra od přepážky	$\delta_{pž}$	0,005	m
Šířka kanálu	δ_k	1,6465	m
Délka kanálu	d_k	2,115	m
Počet trubek v jedné řadě	$n_{\text{řad}}$	24	-
Počet vrstev	n_{vrstev}	12	-

Nejmenší průtočný průřez výměníku

$$S_p = d_k \cdot \check{s}_k - (d_2 \cdot u + D \cdot \delta_z) \cdot n_{1rad} \cdot n_z \cdot (d_k - 2 \cdot \delta_{p\check{z}} - \delta_p) - \check{s}_k \cdot \delta_p - \quad (7.5)$$

$$- d_2 \cdot \delta_{p\check{z}} \cdot n_{1rad} \cdot 2 = 2,115 \cdot 1,6465 - (0,03 \cdot 0,00475 + 0,062 \cdot 0,0015) \cdot 24 \cdot$$

$$\cdot 160 \cdot (2,115 - 2 \cdot 0,005 - 0,005) - 1,6465 \cdot 0,005 - 0,03 \cdot 0,005 \cdot 24 \cdot 2 =$$

$$= 1,5678 \text{ m}^2$$

Skutečná plocha výměníku

$$S_{skut} = S' \cdot (d_k - 2 \cdot \delta_{p\check{z}} - \delta_p) \cdot n_{1rad} \cdot n_{vrstev} + \pi \cdot d_2 \cdot (\delta_p + 2 \cdot \delta_{p\check{z}}) = \quad (7.6)$$

$$= 0,8583 \cdot (2,115 - 2 \cdot 0,005 - 0,005) \cdot 24 \cdot 12 + \pi \cdot 0,03 \cdot (0,005 +$$

$$+ 2 \cdot 0,005) = 519,10 \text{ m}^2$$

7.4 Podobnostní čísla

Než budou určeny součinitelé přestupu a prostupu tepla, je zapotřebí využít teorii pravděpodobnosti. Ta vychází z předchozích poznatků a zkoumání. Za určitých podmínek jsou si děje velmi podobné a lze pro ně využít stejných rovnic. V tabulce 7-4 jsou uvedeny vlastnosti vzduchu ve výparníku. Parametry jsou vztaženy k průměrné teplotě proudícího vzduchu. Tyto hodnoty budou využity k výpočtu rychlosti vzduchu a k výpočtu podobnostních čísel.

Tab. 7-4 Vlastnosti vzduchu v tepelném výměníku [7],[39]

Název veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Průměrná teplota	$t_{vz.stř}$	47,5	°C
Průměrná hustota	$\rho_{vz.stř}$	1,0565	kgv.vz/m ³
Měrná tepelná kapacita	c_p	1,007	kJ/(kg·K)
Kinematická viskozita	ν	$17,74 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Hmotnostní průtok vzduchu	m_{vz}	5,98	kgv.vz/s
Součinitel teplotní vodivosti	a	$24,515 \cdot 10^{-6}$	m ² /s

Součinitel teplotní vodivosti

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_{vz}} \quad (7.7)$$

Součinitel tepelné vodivosti lze vyjádřit z rovnice (7.7) a pomocí hodnot uvedených v tabulce 5 může být vypočten (7.8).

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho_{vz} = 24,515 \cdot 10^{-6} \cdot 1007 \cdot 1,0565 = 0,0261 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (7.8)$$

Dále před samotným výpočtem podobnostních čísel je potřeba stanovit charakteristický rozměr a rychlost proudícího vzduchu v nejužším průtočném průřezu výměníku. Charakteristický rozměr se rovná **ekvivalentnímu průměru žebra** (7.9).

$$d_e = \frac{S_t \cdot d_2 + S_z \cdot \sqrt{\frac{S_z}{2 \cdot n_z}}}{S'} = \frac{0,0716 \cdot 0,03 + 0,7867 \cdot \sqrt{\frac{0,7867}{2 \cdot 160}}}{0,5699} = 0,0479 \text{ m} \quad (7.9)$$

Z kapitoly 6.4 je známo množství proudícího vlhkého vzduchu. Z tabulky 5 je známa průměrná hustota a v rovnici (7.5) je vypočtena nejmenší průtočná plocha. Pomocí těchto hodnot se určí rychlost vzduchu v nejužším průtočném průřezu.

$$v = \frac{\dot{m}_{v.vz}}{\rho_{vz} \cdot S_p} = \frac{5,98}{1,0565 \cdot 1,5678} = 3,6103 \frac{m}{s} \quad (7.10)$$

Nyní jsou známi potřebné hodnoty pro výpočet podobnostních čísel.

Reynoldsovo číslo

$$Re_{d_e} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot d_e}{\nu} = \frac{3,6103 \cdot 0,0479}{17,74 \cdot 10^{-6}} = 9748,217 \quad (7.11)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{17,74 \cdot 10^{-6}}{24,515 \cdot 10^{-6}} = 0,7236 \quad (7.12)$$

Součinitel přestupu tepla bude určen dle SVÚSS. S tím souvisí rovnice pro výpočet Nusseltova čísla. Tato rovnice se liší pro různé podmínky a je potřeba ji správně určit. Jelikož je zvoleno vystřídání uspořádání žebrovek, je následující rovnice vybrána podle tohoto typu uspořádání. Dále aby byla tato rovnice přesně určena, je potřeba využít vypočteného Reynoldsova čísla a vybrat rovnici, která splňuje potřebnou podmínku. Podmínka, která je hodnotou Reynoldsova čísla splněna, je ve tvaru $Re_{d_e} = 1500 \cdot \frac{d_e}{d_h}$ až 70 000. Těmito dvěma podmínkám odpovídá jedna rovnice (7.15). Ta je využita pro stanovení hodnoty Nusseltova čísla.

$$d_h = \frac{4 \cdot S_p}{o} = \frac{4 \cdot S_p}{2 \cdot (u \cdot 2 \cdot n_{1řad} \cdot 168 + \delta_{pž} \cdot 2 \cdot n_{1řad} + (2 \cdot h + \delta_z) \cdot 2 \cdot 168 \cdot n_{1řad}) + š_k \cdot d_k} \quad (7.13)$$

Po dosazení vychází $d_h = 0,0101 m$. Hydraulický průměr (d_h) je počítán pro největší omečený obvod (o). Tzn. poměr $\frac{d_e}{d_h}$ je největší hodnota.

$$\frac{d_e}{d_h} = \frac{0,0479}{0,0101} = 4,74 \quad (7.14)$$

Nusseltovo číslo

$$\begin{aligned} Nu &= 0,32 \cdot Re_{d_e}^{0,67} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{d_2}\right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{u} + 1\right)^{-0,2} \cdot Pr^{\frac{2}{3}} = \\ &= 0,32 \cdot 9748,217^{0,67} \cdot \left(\frac{0,067 - 0,03}{0,03}\right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{0,052 - 0,03}{0,00475} + 1\right)^{-0,2} \cdot 0,7236^{\frac{2}{3}} = \\ &= 75,3448 \end{aligned} \quad (7.15)$$

7.5 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je důležitý pro výpočet požadované plochy tepelného výměníku. Pro jeho stanovení je potřeba znát vnitřní a vnější plochy teplosměnných ploch, tloušťku a tepelnou vodivost trubky. Další potřebné veličiny jsou součinitelé přestupu tepla na straně vzduchu a na straně vody, resp. vodní páry. Téměř všechny hodnoty jsou již určeny, kromě součinitelů přestupu tepla.

Součinitel přestupu tepla na ekvivalentním průměru žebra (7.16) se stanoví podle výše vypočteného podobnostního čísla. Pro výpočet tohoto součinitele se využije Nusseltova čísla.

$$\alpha_z = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_e} = 75,3448 \cdot \frac{0,0261}{0,0479} = 41,0543 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7.16)$$

Součinitel přestupu tepla v trubce je pro tento případ problematické určit. V trubce se zároveň nachází voda a vodní pára, protože dochází k vypařování. Po prozkoumání materiálů a na základě konzultace s vedoucím práce, byl vybrán rozsah, ve kterém by se mohl součinitel přestupu tepla pohybovat (jednotky až desítky tisíc). Velikost součinitele byla zvolena spíše nižší hodnota. Důvodem je ovlivnění součinitele přestupu tepla. Při zvolení vysoké hodnoty by součinitel přestupu tepla záležel spíše na součiniteli přestupu tepla na straně žeber. Z tohoto důvodu je volena nižší hodnota **součinitele přestupu tepla v trubce**.

$$\alpha_1 = 10000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Před určením součinitele přestupu tepla na straně žeber je potřeba znát účinnost žeber. K tomu budou potřeba dvě hodnoty, jejich velikosti jsou určeny rovnicemi (7.17) a (7.18).

Koeficient pro výpočet účinnosti žebra

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_z}{\lambda_m \cdot \delta_z}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 41,0543}{22,5 \cdot 0,0015}} = 49,3239 \text{ m}^{-1} \quad (7.17)$$

Ekvivalentní výška žebra

$$h' = \frac{D - d_2}{2} \cdot \left(1 + 0,35 \cdot \ln \frac{D}{d_2}\right) = \frac{0,062 - 0,03}{2} \cdot \left(1 + 0,35 \cdot \ln \frac{0,062}{0,03}\right) = 0,0201 \text{ m} \quad (7.18)$$

Účinnost žebra

$$\eta_z = \frac{t_{gh}(\beta \cdot h')}{\beta \cdot h'} = \frac{t_{gh}(49,3239 \cdot 0,0201)}{49,3239 \cdot 0,0201} = 0,7645 \quad (7.19)$$

Pro stanovení velikosti součinitele přestupu tepla na straně žeber jsou již znány všechny potřebné hodnoty. **Střední zdánlivý součinitel přestupu tepla** je vypočten následující rovnicí (7.20).

$$\bar{\alpha} = \alpha_z \cdot \frac{S_z}{S'} \cdot \left(\eta_z + \frac{S_t}{S_z}\right) = 41,0543 \cdot \frac{0,7867}{0,8583} \cdot \left(0,7645 + \frac{0,0716}{0,7867}\right) = 32,1925 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7.20)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{S'}{S_1} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_t}{\lambda_m}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{32,1925} + \frac{0,8583}{0,0785} \cdot \left(\frac{1}{10000} + \frac{0,0025}{22,5}\right)} = 29,9658 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7.21)$$

7.6 Výpočet potřebné plochy a porovnání se skutečnou plochou

Potřebná plocha je plocha, kterou tepelný výměník musí přibližně mít pro předání tepelné energie ohřivanému médiu. Ohřivacím médiem je teplý vzduch opouštějící sušárnu dřeva. Ve výměníku dojde k poklesu teploty vzduchu a kondenzaci vodní páry. Ohřivané médium je voda a odpařená vodní pára, která proudí skrze trubky výměníku. Množství tepelné energie nutné odebrat proudícímu vzduchu, aby došlo ke kondenzaci 100 kg vody za hodinu je vypočteno v rovnici (6.47). Množství tepelné energie předané v tepelném výměníku je dáno rovnicí (7.22). V této rovnici jsou známy dva parametry a to množství předané tepelné energie, neboli tepelný tok a součinitel prostupu tepla. Neznámé veličiny jsou potřebná plocha a střední logaritmický teplotní spád.

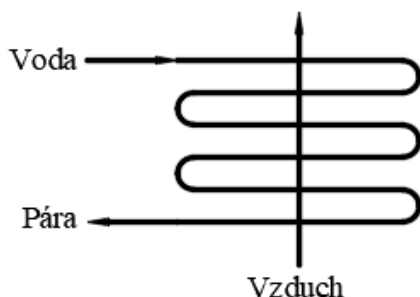
Tepelný tok žebrovanou trubkou

$$|\dot{Q}| = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t} \quad (7.22)$$

Střední logaritmický teplotní spád je dán teplotou ohřivacího média (vzduch), tak i teplotou ohřivaného média (voda a vodní pára). Teploty ohřivacího vzduchu na vstupu a výstupu výměníku jsou známy. Nejsou určeny teploty ohřivané vody a páry, ale jsou známé skupenství na vstupu a výstupu výměníku. Do výměníku vstupuje voda a vystupuje vodní pára. Aby došlo k odpaření vody za nižší teploty, je potřeba snížit tlak. Využitím expanzního ventilu, může být tlak snížen na požadovanou hodnotu. Teplota vody a vodní páry musí být nižší než teplota proudícího vzduchu. Jinak by nedocházelo k ochlazování, ale k ohřevu vzduchu. Ve výměníku se výrazně nezmění teplota ohřivané látky. Jedná se o změnu maximálně pár jednotek stupňů Celsia. Jestliže expanzní ventil sníží tlak na hodnotu 7,5 kPa a bude-li mít voda 40 °C, bude se voda nacházet ve skupenství kapalném. Průchodem výměníku dojde k odpaření vody a k ohřevu. Zvýši-li se teplota na 42 °C, bude voda již v plynném skupenství. Teplota na výstupu z výměníku je ovlivněna množstvím proudící vody, viz kalorimetrická rovnice (4.1). Teplota na vstupu do výměníku je ovlivněna expanzním ventilem, kondenzátorem a kompresorem. Tabulka 7-5 znázorňuje zvolené teploty na vstupu a výstupu z tepelného výměníku.

Tab. 7-5 Teploty jednotlivých médií v tepelném výměníku

Název veličiny	Označení	Vstup - 2	Výstup - 0	Jednotka
Teplota vzduch	t_{vz}	50	45	°C
Teplota chladiva	t_{ch}	40	42	°C



Vzhledem k proudění ohřivací a ohřivané látky, můžou v tepelném výměníku proudit látky v souproudu, protiproudu, příčně nebo kombinovaně. V případě navrženého výměníku se jedná o kombinované proudění. Nejprve se určí logaritmický teplotní spád pro protiprouděné proudění (7.25). Obrázek 31 ukazuje směr proudění jednotlivých látek.

Obr. 31 Kombinované proudění ve výměníku tepla

Rozdíly teplot proudícího vzduchu a chladiva potřebné pro výpočet logaritmického teplotního spádu protiproudého proudění.

$$\Delta t_{1p} = t_{vz2} - t_{ch0} = 50 - 42 = 8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.23)$$

$$\Delta t_{2p} = t_{vz0} - t_{ch2} = 45 - 40 = 5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.24)$$

Střední logaritmický teplotní spád - protiproud

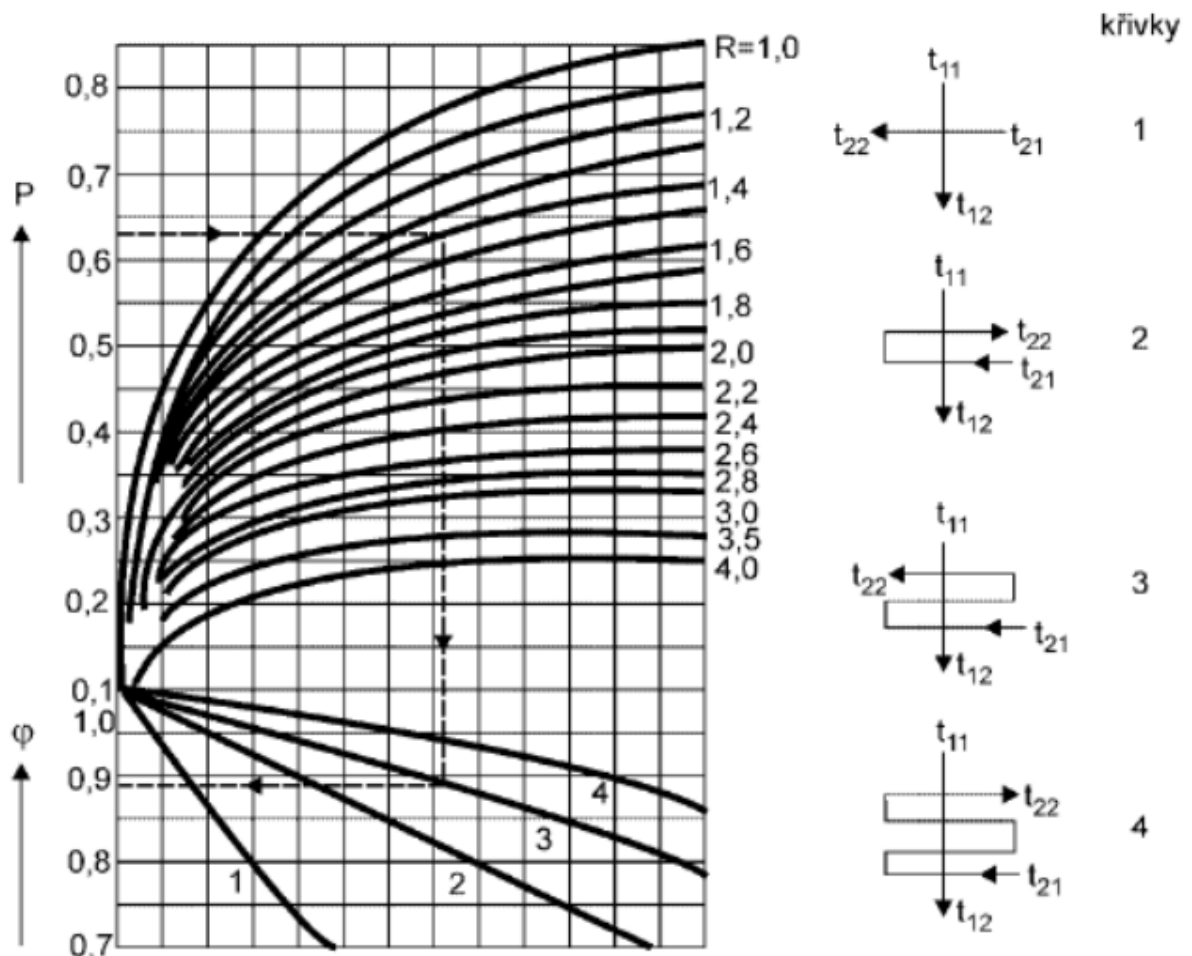
$$\overline{\Delta t_p} = \frac{\Delta t_{2p} - \Delta t_{1p}}{\ln \frac{\Delta t_{2p}}{\Delta t_{1p}}} = \frac{5 - 8}{\ln \frac{5}{8}} = 6,3829 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.25)$$

Pomocný parametr 1

$$P = \frac{t_{ch0} - t_{ch2}}{t_{vz2} - t_{ch2}} = \frac{42 - 40}{50 - 40} = 0,2 \quad (7.26)$$

Pomocný parametr 2

$$R = \frac{t_{vz2} - t_{vz0}}{t_{ch0} - t_{ch2}} = \frac{50 - 45}{42 - 40} = 2,5 \quad (7.27)$$



Obr. 32 Součinitel ϕ pro výměníky tepla s křížovým proudem [37]

Použitím pomocných parametrů (7.26) a (7.27) se určí z obrázku 32 součinitel φ . Jsou zde uvedeny čtyři typy křivek pro daný počet vrstev. Čím více vrstev výměník obsahuje, tím se všechny hodnoty křivky blíží hodnotě jedna. Pomocí součinitel φ a středního logaritmického teplotního spádu pro protiproud se určí podle rovnice (7.28) **střední logaritmický teplotní spád pro kombinované proudění**.

$$\overline{\Delta t_{komb}} = \varphi \cdot \overline{\Delta t_p} = 0,99 \cdot 6,3829 = 6,3191 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.28)$$

Potřebná plocha výměníku je vyjádřena z rovnice (7.22).

$$S = \frac{|\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}|}{k \cdot \overline{\Delta t_{komb}}} = \frac{|-98300|}{29,9658 \cdot 6,3191} = 519,13 \text{ m}^2 \quad (7.29)$$

Pokud je tepelný výměník správně navržen, tak by se měli hodnoty potřebné a skutečné plochy téměř rovnat ($\pm 0,5 \%$). Skutečná plocha výměníku je menší o $0,006 \%$ vypočteno pomocí rovnice (7.30). Navržený výměník má vnitřní šířku kanálu $1,6465 \text{ m}$ a vnitřní délku $2,115 \text{ m}$. Počet žebrovaných trubek v jedné řadě je 24 a celkový počet vrstev je 12 .

$$\frac{S_{skut}}{S} = \frac{519,10}{519,13} = 0,99994 \quad (7.30)$$

7.7 Tlaková ztráta

Vlivem proudění kolem žebrovaných trubek, vnitřních ploch trubek a místních odporů (vstupní a výstupní hrdlo, kolena trubek apod.) vzniká tlaková ztráta. Dochází k poklesu tlaku.

7.7.1 Tlaková ztráta na straně žeber

Prouděním vzduchu skrze tepelný výměník dochází ke snížení tlaku. Pro jeho stanovení bude potřeba určit součinitel odporu (7.31). Ten bude stanoven dle SVÚSS. Splněná podmínka pro součinitel odporu je $Re_{d_e} = 1000 \cdot \frac{d_e}{d_h}$ až $170\,000$. Poměr $\frac{d_e}{d_h}$ je vypočten v rovnici (7.14).

Součinitel odporu

$$\begin{aligned} \xi &= 1,463 \cdot Re_{d_e}^{-0,245} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{u} + 1\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{d_2}\right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{d_e}{d_2}\right)^{0,9} = \\ &= 1,463 \cdot 9748,217^{-0,245} \cdot \left(\frac{0,067 - 0,03}{0,00475} + 1\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{0,067 - 0,03}{0,03}\right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{0,0479}{0,03}\right)^{0,9} = \\ &= 0,8905 \end{aligned} \quad (7.31)$$

Rychlost vzduchu na vstupu a výstupu tepelného výměníku

$$v_{vz2} = \frac{\dot{m}_{v,vz}}{\rho_{vz2} \cdot \xi_k \cdot d_k} = \frac{5,98}{1,047 \cdot 1,6465 \cdot 2,115} = 1,6401 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7.32)$$

$$v_{vz0} = \frac{\dot{m}_{v,vz} - \frac{n}{3600}}{\rho_{vz0} \cdot \xi_k \cdot d_k} = \frac{5,98 - \frac{100}{3600}}{1,066 \cdot 1,6465 \cdot 2,115} = 1,6034 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7.33)$$

Celková tlaková ztráta na straně žebrovaných trubek

$$\begin{aligned} \Delta p_{vz} &= \xi \cdot n_{vrstev} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho_{vz.stř} + 2 \cdot \left(\frac{v_{vz0}}{2} \cdot \rho_{vz0} - \frac{v_{vz2}}{2} \cdot \rho_{vz2} \right) = \\ &= 0,8905 \cdot 12 \cdot \frac{3,6103^2}{2} \cdot 1,0565 + 2 \cdot \left(\frac{1,6034}{2} \cdot 1,066 - \frac{1,6401}{2} \cdot 1,047 \right) = \\ &= 73,6 \text{ Pa} \end{aligned} \tag{7.34}$$

7.7.2 Tlaková ztráta uvnitř trubek

Při proudění chladiva kolem stěn trubek vzniká tlaková ztráta vlivem tření. Dále se zvyšuje při průchodu různými armaturami a při změnách směru.

Pro výpočet tlakové ztráty je potřeba znát hustotu vody a vodní páry ve výměníku. Podle programu SteamTable byly určeny jejich přibližné hodnoty pro velmi nízký tlak, tabulka 7-6.

Tab. 7-6 Hustoty chladiva v tepelném výměníku

Název veličiny	Označení	Velikost	Jednotka
Hustota vody	ρ_{voda}	992	kg/m ³
Hustota páry	$\rho_{pára}$	0,052	kg/m ³

Aby se mohla určit rychlost vody, respektive vodní páry je potřeba znát **hmotnostní průtok chladiva**. Ten bude určen pomocí množství tepelné energie, kterou je potřeba odebrat proudícímu vzduchu (6.47), aby došlo ke kondenzaci požadovaného množství vody. Měrná tepelná kapacita vodní páry je 1860 $\frac{J}{kg \cdot K}$ [43]. Parametry změn teploty vody a vodní páry jsou voleny z teploty chladiva na vstupu a výstupu výměníku, tabulky 7-5. Rozdíl hodnot je 2 °C a to je výsledek součtu obou dvou teplotních změn (7.36). Je zvolena rovnováha mezi teplotou ohřevu vody a vodní páry. Tyto hodnoty příliš neovlivňují výslednou hodnotu hmotnostního průtoku chladiva. Nejvíce záleží na skupenském teple vody. Pro výpočet je předpokládáno, že se hodnota skupenského tepla při snížení tlaku nezmění.

$$|\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}| = \dot{m}_{ch} \cdot c_{voda} \cdot \Delta t_{voda} + \dot{m}_{ch} \cdot Q_{vyp.vody} + \dot{m}_{ch} \cdot c_{pára} \cdot \Delta t_{pára} \tag{7.35}$$

$$\dot{m}_{ch} = \frac{|\dot{Q}_{in1} - \dot{Q}_{out1}|}{c_{voda} \cdot \Delta t_{voda} + Q_{vyp.vody} + c_{pára} \cdot \Delta t_{pára}} = \frac{|-98300|}{4180 \cdot 1 + 2257000 + 1860 \cdot 1} = 0,0434 \frac{kg}{s} \tag{7.36}$$

Rovnice (7.36) udává množství vody, která musí proudit tepelným výměníkem, aby bylo odebráno požadované teplo.

Rychlost vodní páry by neměla být příliš vysoká, proto se musí vhodně zvolit množství vstupů do tepelného výměníku. Pro tento návrh je zvoleno $n_{vst} = 72$ vstupů, to jsou tři celé řady. K tomu odpovídá určitá rychlost proudění pro vodu a vodní páru. Předpokladem je, že ve všech trubkách proudí stejné množství vody. **Rychlost vody v potrubí** je dána rovnicí (7.37).

$$v_{voda} = \frac{\dot{m}_{ch}}{\rho_{voda} \cdot S_p} = \frac{\dot{m}_{ch}}{\rho_{voda} \cdot \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}} = \frac{0,0434}{992 \cdot \pi \cdot \frac{0,025^2}{4}} = 0,0012 \frac{m}{s} \tag{7.37}$$

Rychlost vodní páry v potrubí

$$v_{pára} = \frac{\frac{\dot{m}_{ch}}{n_{vst}}}{\rho_{pára} \cdot S_p} = \frac{\frac{\dot{m}_{ch}}{n_{vst}}}{\rho_{pára} \cdot \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}} = \frac{\frac{0,0434}{72}}{0,052 \cdot \pi \cdot \frac{0,025^2}{4}} = 23,615 \frac{m}{s} \quad (7.38)$$

Velikost **součinitele tření** pro ocel se pohybuje od setin do desetin. Je zvolena hodnota $\lambda_{tř} = 0,1$.

Tab. 7-7 Součinitel místních ztrát ξ_k [-] pro koleno [44]

DN	ξ_k
10 - 15	2,00
20 - 25	1,50
32 - 40	1,00
50 a více	0,50

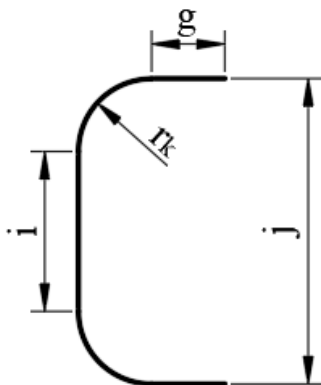
Podle tabulky 7-7 byl stanoven součinitel místních ztrát pro kolene $\xi_k = 1,5$. Podle stejného zdroje byly stanoveny součinitele místních ztrát pro vstup $\xi_{vst} = 1$ a výstup $\xi_{výst} = 0,5$ potrubního rozdělovače. Dále je potřeba určit **celkovou délkou potrubí**. V ní je započítána délka trubky ve výměníku, délka vyčnívajícího konce trubky z výměníku a délka obratového oblouku (komory). Jelikož zde není započteno proudění v potrubních rozdělovačích, je výsledná hodnota z důvodu bezpečnosti vyšší. Navržený výměník má tři obratové oblouky pro jedno potrubí.

$$L = d_k \cdot \frac{n_{vrstev}}{b} + 2 \cdot e \cdot \frac{n_{vrstev}}{b} + n_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot \frac{1}{4} + n_1 \cdot (2 \cdot g + i) = \quad (7.39)$$

$$= 2,115 \cdot \frac{12}{3} + 2 \cdot 0,05 \cdot \frac{12}{3} + 6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{4} + 3 \cdot (2 \cdot 0,05 + 0,126552) =$$

$$= 9,97 \text{ m} \cong 10,2 \text{ m}$$

kde b počet řad vstupů do výměníku, e je délka trubky mezi výměníkem a potrubním rozdělovačem, n_k je počet kolen jedné trubky, r_k je poloměr kolene potrubí, n_1 je počet obratových oblouků jedné trubky, g je rozměr obratového oblouku, i je rozměr obratového oblouku, n_2 je počet potrubních rozdělovačů jedné trubky



$$r_k = 50 \text{ mm}$$

$$g = 50 \text{ mm}$$

$$j = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + (3 \cdot s_2)^2} \doteq 212,6552 \text{ mm} \quad (7.40)$$

$$i = j - 2 \cdot r_k = 112,6552 \text{ mm} \quad (7.41)$$

Obr. 33 Převáděcí potrubí – oblouk

Určení přesné ztráty tlaku v celé trubce je velmi problematické, protože voda a pára mají výrazně jinou hustotu a rychlost proudění. To znamená, že na stejnou délku trubky mají rozdílné tlakové ztráty. Vypařování vody probíhá na určitém úseku. Pro zjednodušení bude tento úsek zmenšen na určitý bod, ve kterém se odpaří všechna voda. Pro názornost bude uvedena celková ztráta tepelného výměníku (7.45). Ta bude vypočtena pro vypaření vody v polovině délky trubky. Počet rozdělovačů na potrubní trase je 6.

Tlaková ztráta na úseku vody, při vypaření vody v polovině délky trubky.

$$\begin{aligned} \Delta p_{voda} &= \left(\lambda_{tř} \cdot \frac{L \cdot usek1}{d_1} + \sum \xi_{voda} \right) \cdot \frac{v_{voda}^2}{2} \cdot \rho_{voda} = & (7.42) \\ &= \left(\lambda_{tř} \cdot \frac{L \cdot usek1}{d_1} + \xi_k \cdot n_k \cdot usek1 + \xi_{vst} \cdot n_2 \cdot usek1 + \xi_{výst} \cdot n_2 \cdot usek1 \right) \cdot \\ &\cdot \frac{v_{voda}^2}{2} \cdot \rho_{voda} = \left(0,1 \cdot \frac{10,2 \cdot 0,5}{0,025} + 1,5 \cdot 6 \cdot 0,5 + 1 \cdot 6 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 6 \cdot 0,5 \right) \cdot \\ &\cdot \frac{0,0012^2}{2} \cdot 992 = 0,022 Pa \end{aligned}$$

Tlaková ztráta na úseku páry, při vypaření vody v polovině délky trubky.

$$\begin{aligned} \Delta p_{pára} &= \left(\lambda_{tř} \cdot \frac{L \cdot usek2}{d_1} + \sum \xi_{pára} \right) \cdot \frac{v_{pára}^2}{2} \cdot \rho_{pára} = & (7.43) \\ &= \left(\lambda_{tř} \cdot \frac{L \cdot usek2}{d_1} + \xi_k \cdot n_k \cdot usek2 + \xi_{vst} \cdot n_2 \cdot usek2 + \xi_{výst} \cdot n_2 \cdot usek2 \right) \cdot \\ &\cdot \frac{v_{pára}^2}{2} \cdot \rho_{pára} = \left(0,1 \cdot \frac{10,2 \cdot 0,5}{0,025} + 1,5 \cdot 6 \cdot 0,5 + 1 \cdot 6 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 6 \cdot 0,5 \right) \cdot \\ &\cdot \frac{23,615^2}{2} \cdot 0,052 = 426,274 Pa \end{aligned}$$

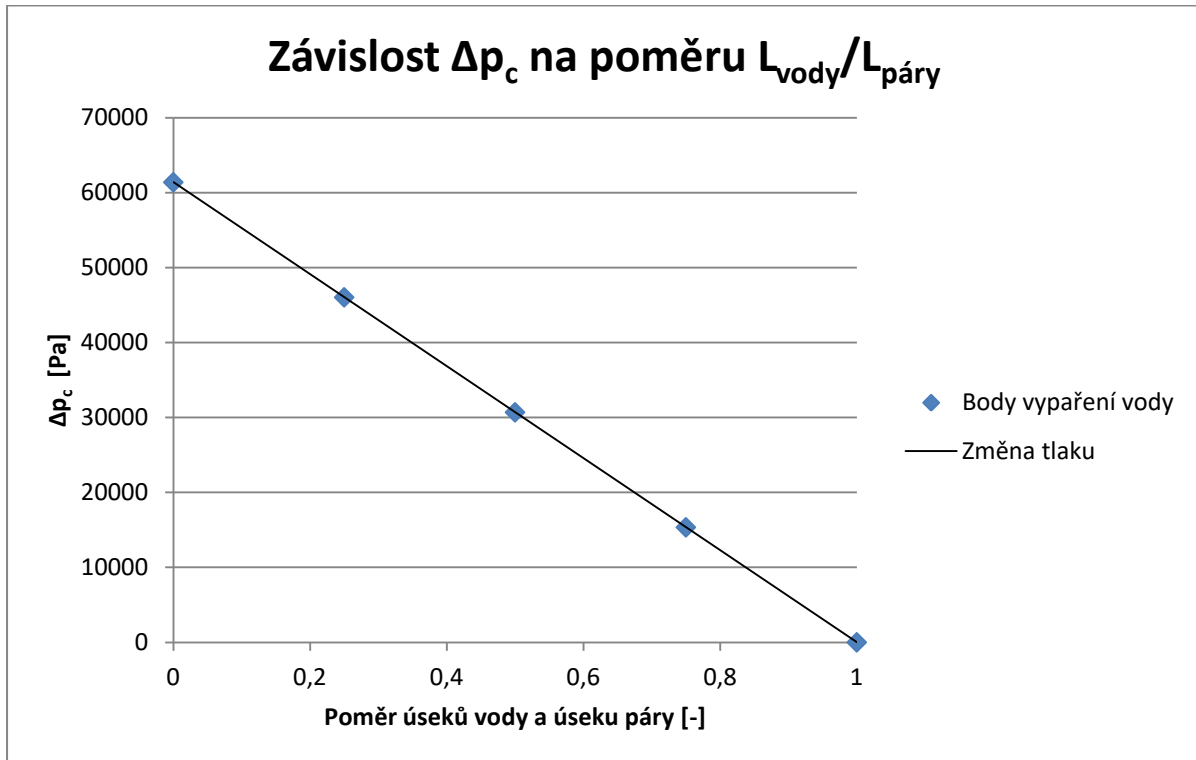
Tlaková ztráta v jedné trubce tepelného výměníku, při vypaření vody v polovině délky trubky.

$$\Delta p_{voda-pára} = \Delta p_{voda} + \Delta p_{pára} = 0,022 + 426,274 = 426,296 Pa \quad (7.44)$$

Celková tlaková ztráta tepelného výměníku uvnitř trubek, při vypaření vody v polovině délky trubek.

$$\Delta p_c = \Delta p_{voda-pára} \cdot n_{vst} = 426,296 \cdot 72 \doteq 30,693 kPa \quad (7.45)$$

Podobným postupem byly stanoveny další hodnoty. Proložením lineární spojnicí trendu je možné odečíst z Grafu 1 celkovou tlakovou ztrátu potrubí v závislosti na místě odpaření vody.

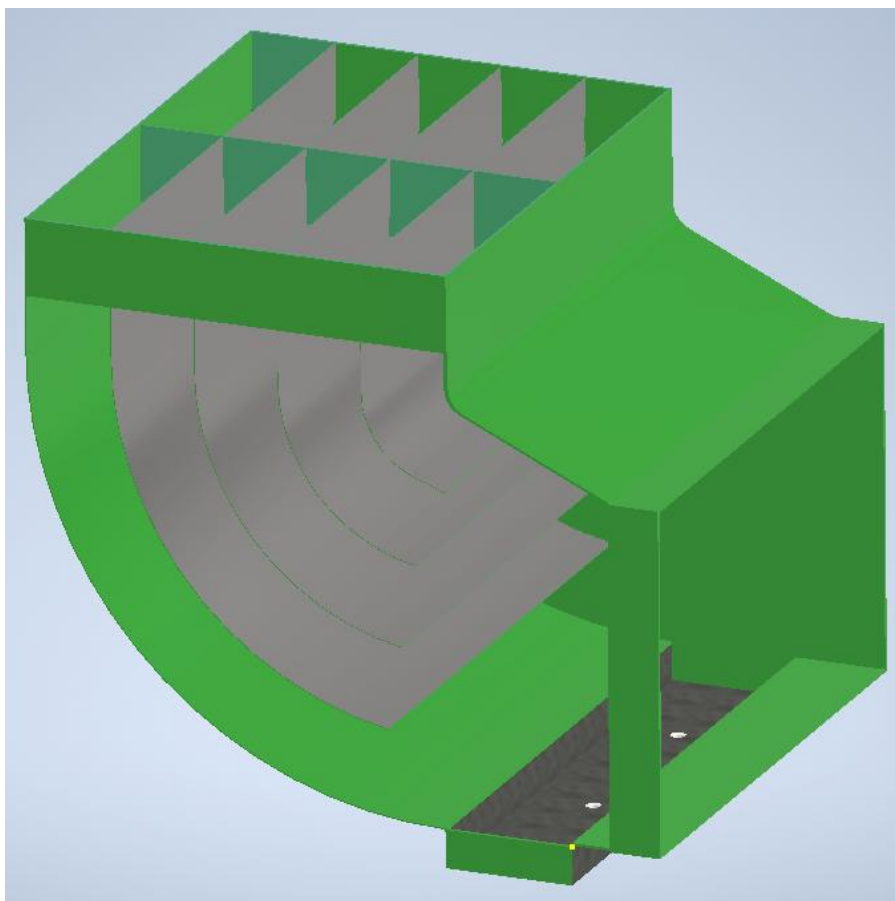
Graf 1 Závislost změny celkového tlaku na poměru délky úseku vody a úseku páry

Kde na ose x pro 0 je bod vypařování na vstupu a v celém potrubí je pára. Pro 1 na ose x je bod vypařování na konci potrubí a v celém potrubí je voda. Z grafu vyplývá, že při odpaření vody na konci potrubní trasy, budou tlakové ztráty výrazně nižší.

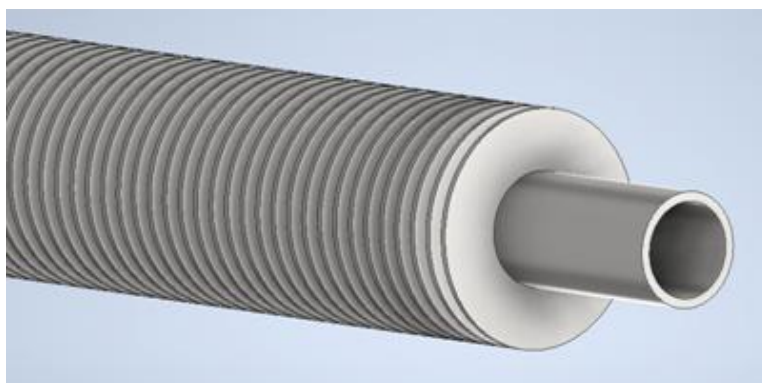
7.8 Obrázky a technické výkresy navrženého tepelného výměníku

Navržený tepelný výměník slouží k odebrání tepelné energie proudícímu vzduchu ze sušárny, zároveň dojde ke kondenzaci odpařené vody. Vzduch ze sušárny projde skrze vstupní hrdlo obrázek 34. Zde dojde k rovnoměrnému rozdělení proudícího vzduchu a následně je přiveden do tepelného výměníku. Větší částice narazí na stěny vstupního hrdla. Tím dojde k snížení jejich kinetické energie a padají dolů, například do sběrné „nádoby“ kondenzátu. Menší částice dřevní hmoty mohou projít skrze celý výměník nebo se v něm můžou zapříčít. Z tohoto důvodu je možné při výměně sušeného dřeva (sušárna není v provozu) otevřít boční stěnu tepelného výměníku a pomocí proudu vody zapříččené drobné částice odstranit, obrázek 40. Při provozu vzduch projde výměníkem (chladičem) a proudí do dalšího výměníku, kde se ohřeje. Jelikož vzduch neproudí příliš rychle, tak zkondenzovaná voda padá směrem dolů a je zachycena v kondenzátní „nádobě“.

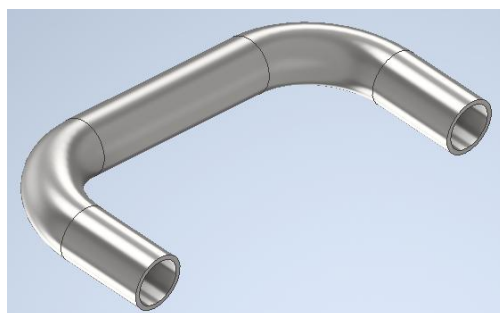
Zvoleným chladivem je voda. Ta proudí v trubkách výměníku a vlivem odebrané tepelné energie se zahřívá a odpařuje. Obrázky 38 a 39 znázorňují tepelný výměník. Jsou zde vidět vstupy a výstupy jednotlivých trubek, potrubní rozdělovače a obrátové oblouky.



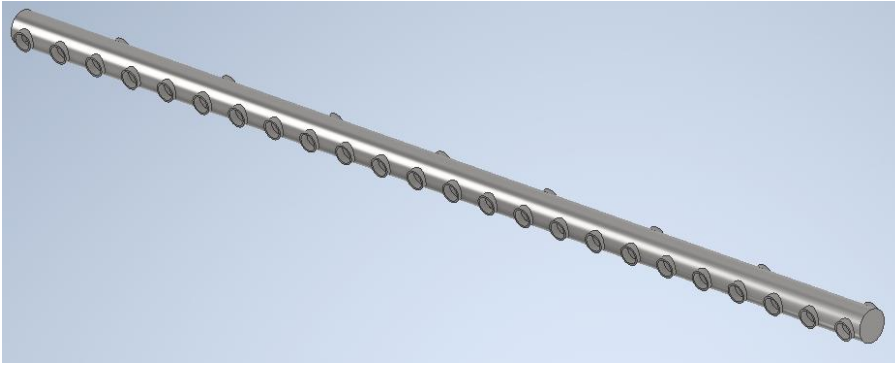
Obr. 34 Vstupní hrdlo s odvodem kondenzátu a s prvky rovnoměrně rozdělující proud



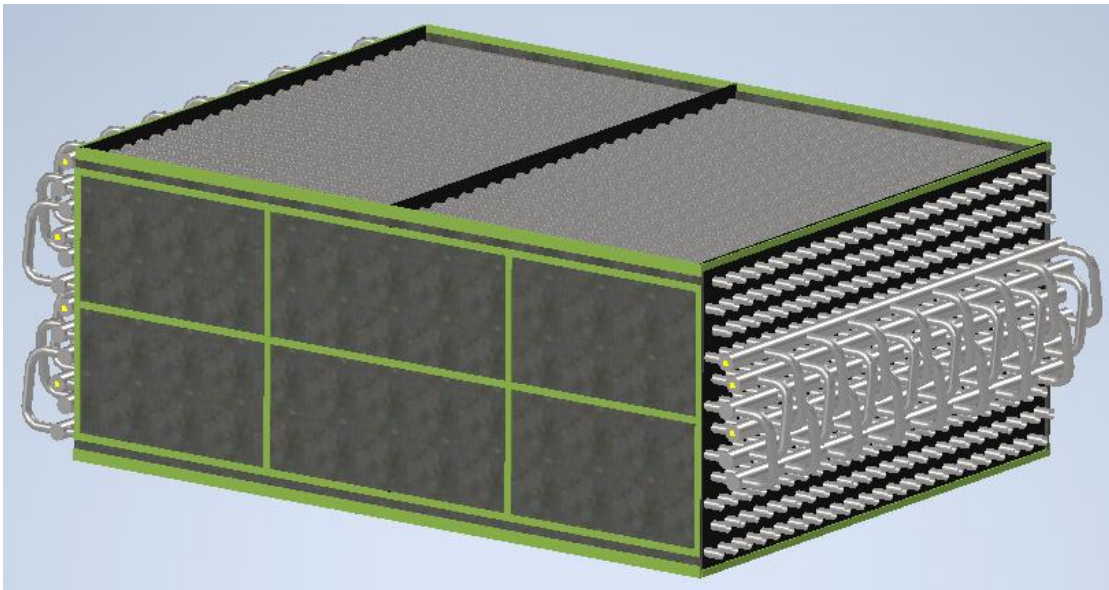
Obr. 35 Detail žebrované trubky



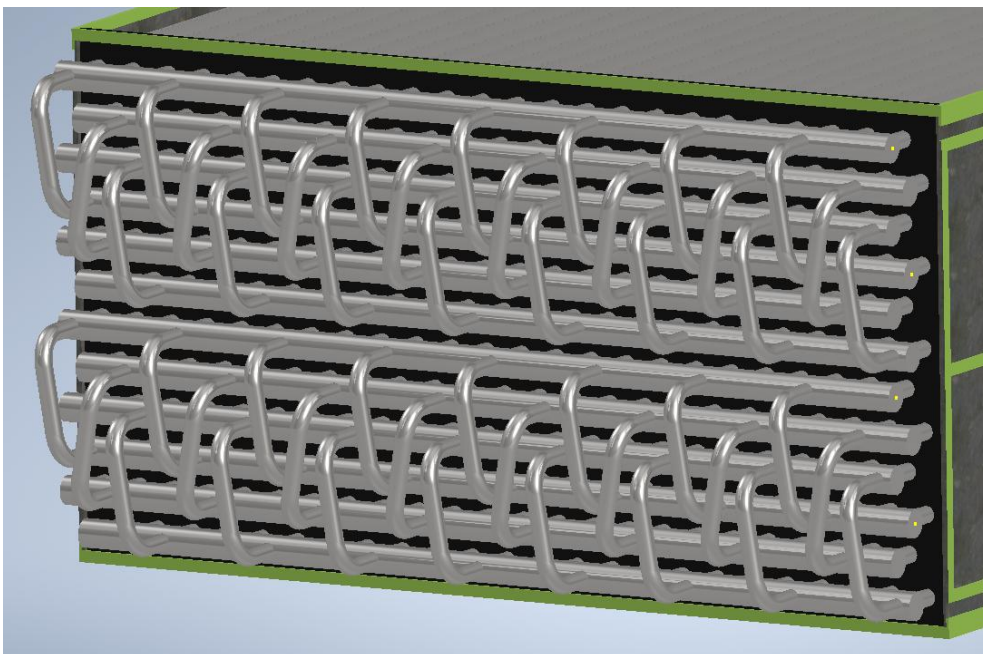
Obr. 36 Obratové potrubí



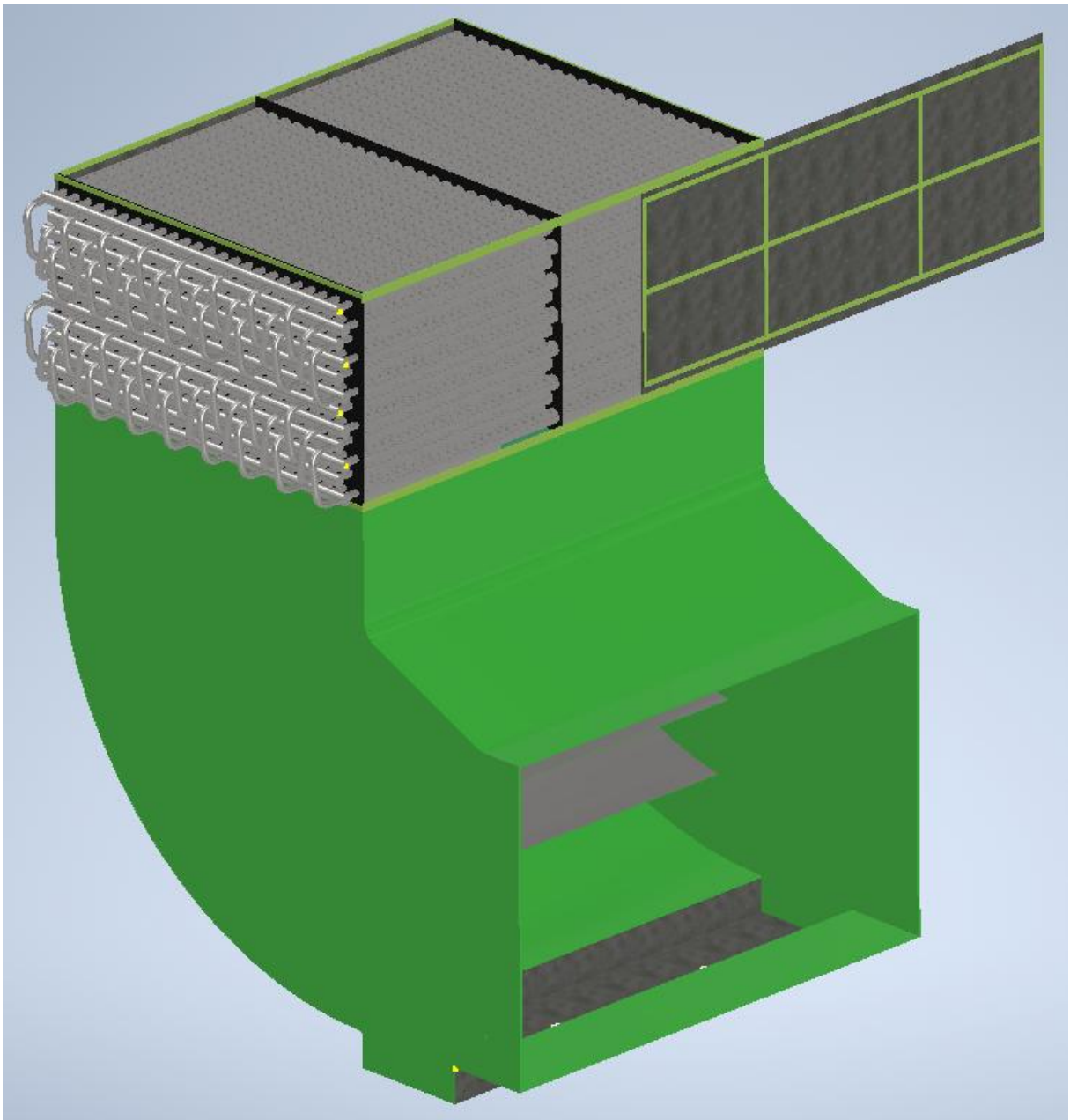
Obr. 37 Potrubní rozdělovač



Obr. 38 Tepelný výměník se vstupy a výstupy

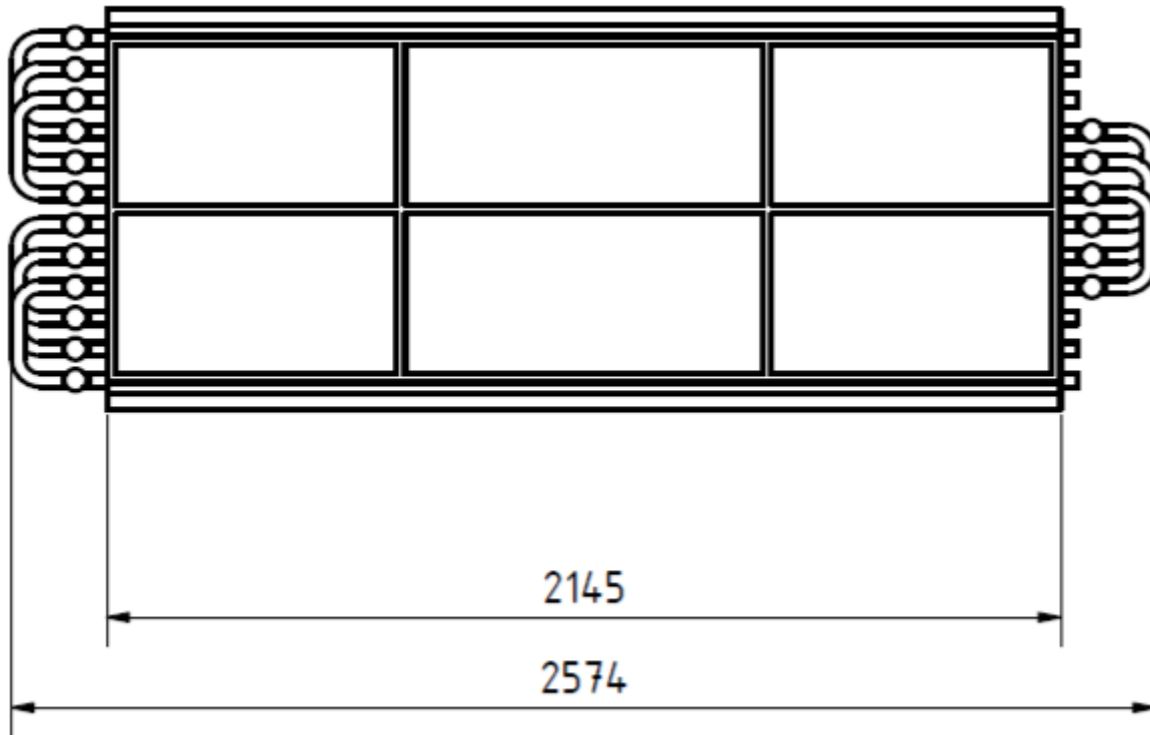


Obr. 39 Detail rozdělovacích a obratových potrubí

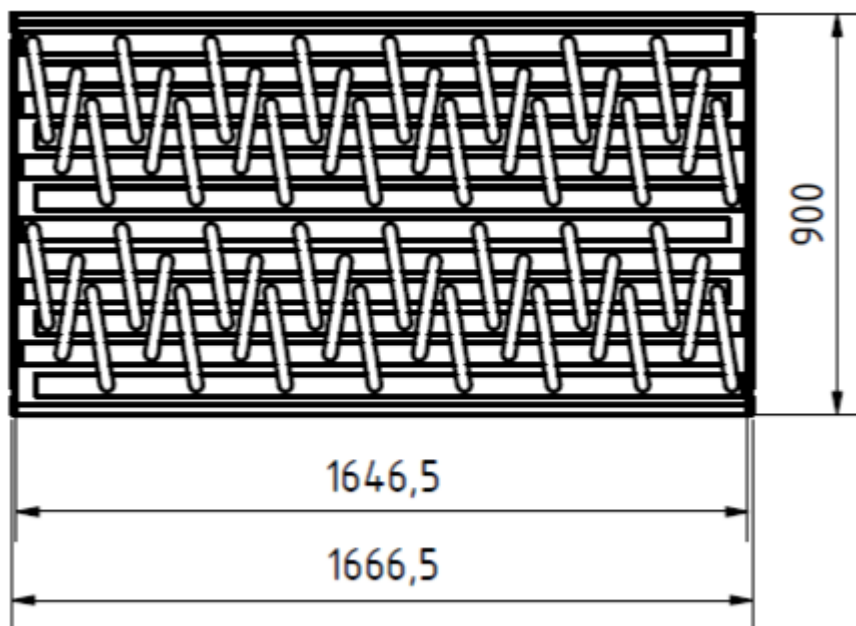


Obr. 40 Kompletní sestava s otevřenou boční stěnou pro čištění výměníku

Hlavní rozměry výměníku jsou zakótovány na obrázcích 41 a 42. Je potřeba uvést, že rozměry budou o něco větší z důvodu zaizolování celého výměníku. Tím se omezí únik tepelné energie do okolního prostoru, případně do prostoru sušárny.



Obr. 41 Základní pohled na tepelný výměník - nárys



Obr. 42 Bokorys

Potřebné vzorce a informace byly nalezeny ve zdrojích [37] a [42].

Závěr

Uvedená diplomová práce je zaměřena na sušení dřevní hmoty. Cílem bylo popsat teplotní požadavky a energetickou náročnost sušení. Dalším cílem bylo navrhnout regenerační výměník s kondenzací vodních par a separací kondenzátu. Důvodem zařazení regeneračního výměníku na výstup ze sušárny je snížit tepelnou energii pro ohřev sušícího média a tím snížit celkové náklady na odpaření vody ze sušené dřevní hmoty.

První polovina práce je zaměřena na teoretickou část. Zabývá se procesem sušení a používanými sušícími médii. Sušení je proces odstraňování vody z materiálu. Je to velmi důležitý proces a využívá se v mnoha odvětvích. Pro energetický průmysl se palivo suší za účelem zvýšení výhřevnosti a lepší spalitelnosti. Sušení dřeva se vykonává v zařízení zvaném sušárna. Různé typy sušáren jsou popsány ve třetí kapitole. Jelikož většina sušáren potřebuje ke své činnosti tepelnou energii, následuje kapitola zdroje tepelné energie. Poslední kapitolou teoretické části je teorie k bilanci sušáren. Zde jsou uvedeny potřebné vztahy a informace, které jsou následně využity v praktické části.

Druhá polovina práce je praktická část. Tepelný výměník je vypočítán pro komorovou sušárnu. Před samotným návrhem tepelného výměníku bylo potřeba stanovit parametry proudícího vzduchu a jeho množství. V současnosti dochází k snižování spotřebované energie, proto byla zvolena sušárna s uzavřeným oběhem. U tohoto typu není odpadní vzduch vypouštěn ze sušárny do okolí, ale po jeho úpravě je přiveden zpět do sušárny. Nejprve vzduch projde chladičem, sníží se jeho teplota a dojde ke kondenzaci vodní páry. Dále projde dalším výměníkem nebo skupinou výměníků. V nich se předá proudícímu vzduchu tepelná energie, následně je vháněn do prostoru sušárny. Zařízení, které umožňuje snížit vlhkost vzduchu a následně ho ohřeje je tepelné čerpadlo. Velkou výhodou tohoto zařízení je zpětné využití odebraného tepla ze vzduchu a uvolněného skupenského tepla. Pokud se umístí za tepelné čerpadlo tepelný výměník nebo skupina tepelných výměníků, bude na vstupu do sušárny vyšší teplota vzduchu. Čím vyšší bude jeho teplota, tím bude potřeba menší průtok vzduchu, za určitých podmínek.

K odstranění vody z proudu odpadního vzduchu je zvoleno tepelné čerpadlo. Zdrojem elektrické energie pro jeho funkci je kogenerační jednotka. Ta společně s elektřinou vyrábí i tepelnou energii. V návrhu je toto teplo využito v bubnové sušárně a ve dvou tepelných výměnících umístěných za tepelným čerpadlem. Od komorové sušárny je požadováno odpaření 100 kg vody za hodinu. Aby došlo k odpaření tohoto množství vody je potřeba předat v komorové sušárně přibližně 180 kW tepelné energie (platí pro určitý typ dřeva). Pro komorovou sušárnu s tepelným čerpadlem a dvěma výměníky tepla bylo stanoveno množství proudícího vlhkého vzduchu, hodnota činí $5,98 \frac{kg_{v.vz}}{s}$. Množství vzduchu záleží na zvolených a vypočtených parametrech proudícího vzduchu. Dále bylo vypočteno množství tepla, které je nutné odebrat proudícímu vzduchu, aby došlo ke kondenzaci odpařené vody. Velikost odebraného tepla v chladiči je 98,3 kW. Na konci šesté kapitoly je porovnání množství tepelné energie otevřeného a uzavřeného oběhu. V zimním období je pro otevřený oběh potřeba dodat 3,76 krát více tepelné energie oproti uzavřenému oběhu. V jarním období je hodnota nižší

3,18 krát a v letním období 2,81 krát. Využitím regenerace tepla a vody se sníží potřebné množství tepelné energie na ohřev sušícího vzduchu u otevřeného oběhu na 72 % z původní hodnoty.

Tepelný výměník je navržen jako výparník tepelného čerpadla. Teplosměnné plochy výparníku jsou zvoleny žebrované trubky. Na vnější straně proudí vzduchu a ve vnitřním prostoru chladivo. V tomto případě je použita voda, protože parametry vzduchu nemůžou zapříčinit tuhnutí vody. V proudícím vzduchu se mohou nacházet malé částice dřevní hmoty, proto byl zvolen střední nebo spíše menší počet žebek na metr trubky, aby se omezilo zapříčení částic v tepelném výměníku. Navržený výměník má trojúhelníkové uspořádání žebrek. Důvodem je zmenšení celkových rozměrů výměníku a hlavně omezit úniku kapiček vody skrz výměník. Dále pak byla předběžně stanovena délka a šířka průtočného kanálu. Pomocí těchto rozměrů a parametrů žebrovaných trubek byla stanovena skutečná teplosměnná plocha. Následně byly určeny podobnostní čísla, která sloužila k výpočtu součinitele přestupu tepla na straně vzduchu. V trubkách výměníku dochází k vypařování vody. Součinitel přestupu tepla při vypařování se pohybuje velmi vysoko, a jelikož není známá délka vypařovacího úseku, byla hodnota součinitele zvolena. Použila se spíše menší hodnota, protože více ovlivňuje součinitel prostupu tepla. Nakonec se vypočetla potřebná teplosměnná plocha. Ta se porovnála se skutečnou hodnotou. Po různých úpravách se hodnoty skutečné a požadované teplosměnné plochy téměř rovnají. Skutečná plocha je o 0,006 % menší. U navrženého výměníku, lze při odstavce vysunout boční stěnu a proudem vody odstranit zapříčené částice dřevní hmoty.

Nakonec byly zkontrolovány tlakové ztráty ve výměníku. Na straně žebrovaných trubek poklesne tlak o 73,6 Pa. Problémem bylo stanovit tlakové ztráty ve vnitřním prostoru trubek, protože voda a pára mají rozdílné hustoty a rychlosti proudění, tudíž i jiné tlakové ztráty na metr trubky. Z rychlosti proudění souvisí počet vstupů do výměníku. Aby rychlost páry nebyla příliš vysoká, má výparník celkem 72 vstupů. Pro zjednodušení výpočtu byl úsek vypařování zmenšen na jediný bod. Na jedné straně bodu se nachází voda a na druhé pára. Bylo vybráno několik takových bodů, pro které se určili tlakové ztráty. Pomocí nich byl vytvořen graf 1. Největší tlaková ztráta může být něco přes 61 kPa a nejnižší kolem 3 Pa. Tyto krajní hodnoty platí pro vypaření vody na začátku a na konci potrubí. Tlaková ztráta záleží převážně na proudící páře. Na závěr práce je uvedeno několik obrázků navrženého tepelného výměníku se vstupním hrdlem.

Seznam použitých zdrojů

- [1] BALÁŠ, Marek, MOSKALÍK, Jiří: Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
 - [2] Vlhkost dřeva. *Univerzitní informační systém Mendelu* [online]. Brno [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177;lang=cz
 - [3] NUTSCH, Wolfgang. *Příručka pro truhláře. 2.*, přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-867-0614-1.
 - [4] Technický popis sušáren typu SP. *KovoS Nový Knín* [online]. Nový Knín [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://www.kovosnovyknin.cz/sp.html>
 - [5] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN ISBN9788021443006.
 - [6] Engineering ToolBox, (2008). *Compressed Air and Water Content*. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/water-content-compressed-air-d_1275.html [Accessed 24-02-2019].
 - [7] Výpočet vlastností vlhkého vzduchu. *Qpro* [online]. Chlumec nad Cidlinou [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.qpro.cz/Vlastnosti-vlhkeho-vzduchu>
 - [8] Mollierův diagram. *Akime* [online]. Praha [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.akime.cz/clanky/mollieruv-diagram/>
 - [9] Úvod do teorie spalování tuhých paliv. *Výzkumné energetické centrum* [online]. Ostrava [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/194-spalovani-tuhych-paliv-1.pdf>
 - [10] Sušičky dřevní štěpy. *Cyberma* [online]. Praha [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://www.cyberma.cz/susicky-drevni-stepky/>
 - [11] MINEA, Vasile. *Industrial heat pump-assisted wood drying*. Boca Raton, FL, 2018. ISBN 978-1-138-04125-7.
 - [12] MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. *Sušení* [online]. Praha [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k25.suseni.pdf>
 - [13] Sušárny řeziva. *AgriKomp* [online]. Brno-venkov [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: https://agrikomp.com/images/cs-CZ/pdf/susarna_komorova_katres_letak.pdf
 - [14] BREINER, Tom A., Stephen L. QUARLES a Huber, Dean W. HUBER. *Steam and electrical consumption in a commercial scale lumber dry kiln* [online]. Corvallis, Or. : Western Dry Kiln Association [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: https://ir.library.oregonstate.edu/concern/conference_proceedings_or_journals/dr26xz38b?locale=en
-

-
- [15] WORLEY, Matt. Biomass Drying Technology Update. *TAPPI* [online]. Peachtree Corners, 2011 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.tappi.org/content/events/11biopro/19.2worley.pdf>
- [16] SWISS COMBI Belt Dryer LTD. *SWISS COMBI* [online]. Dintikon [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.swisscombi.ch/en/dryers/ltd.html>
- [17] JELEMENSKÝ, Karol a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia vysokoškolských učebnic. ISBN 80-227-1416-X.
- [18] ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-708-0589-7.
- [19] HRÁZSKÝ, Jaroslav a Pavel KRÁL. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007. ISBN ISBN978-80-7375-034-3.
- [20] Technické parametry BS-6. *Sušárny-míchárny* [online]. Rokycany [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: <https://www.susarny-micharny.cz/technicke-parametry-bs-6>
- [21] *Fluidní sušárna* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://adminvolodarsk-nn.ru/fluidni-susarna/>
- [22] VANĚČEK, Vojtěch, Radek DRBOHLAV a Miroslav MARKVART. *Fluidní sušení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Metody a pochody chemické technologie.
- [23] KLEMENT, Ivan a Juraj DETVAJ. *Technológia prvostupňového spracovania dreva: [vysokoškolská učebnica]*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. ISBN 978-80-228-1811-7.
- [24] RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: stroje a zařízení chemického průmyslu : [procesy, stroje a zařízení]*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2012. ISBN 978-80-7414-472-1.
- [25] Ochrana, L., Kadrnožka, J. *Teplárenství*. Brno : CERM, 2001. ISBN 80-7204-222-X.
- [26] LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN ISBN978-80-904914-2-7.
- [27] *Rozdělení kotlů* [online]. [cit. 2019-02-5]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/461575/mod_resource/content/1/kotle-rozdeleni-tisk.pdf
- [28] Kogenerační jednotka GE Jenbacher. *Biom* [online]. Praha [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/obrazek/kogeneracni-jednotka-ge-jenbacher>
- [29] SÍŤAŘ, Vladislav. *Zdroje elektrické a tepelné energie*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta strojního inženýrství, 2017. ISBN ISBN978-80-7561-071-3.
- [30] Anaerobní technologie. *Bioprofit* [online]. Lišov [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
-

-
- [31] El med mikroturbin. *Bioenergiportalen* [online]. Uppsala [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1802&m=1215>
- [32] Teplovzdušné motory. *Abeceda vodních pohonů* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/uvod/stirling.htm>
- [33] Parní stroj - schéma. *Parní stroj* [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://www.parnistroj.czweb.org/schema.html>
- [34] LACHNIT, Petr. Tepelné čerpadlo: Jak funguje?. *ESTAV* [online]. Praha [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/3184.tepelne-cerpadlo-jak-funguje>
- [35] DEJMAL, Aleš. *Sušení a modifikace dřeva* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_BC/Povinne_predmety/Hydrotermicka_uprava_dreva/HUD%20MOD%20obr%20pril%202017.pdf
- [36] Greenhouse to store and dry wood. *Hearth* [online]. 2014 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.hearth.com/talk/threads/i-built-a-12-5-x-28-greenhouse-to-store-and-dry-wood-working-awesome.129149/page-2>
- [37] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [38] OCHRANA, Ladislav. *Kotle průmyslových tepelných centrál*. Brno: VUT Brno, 1990. ISBN 80-214-0223-7.
- [39] *Properties of air at 1 atm pressure* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.mne.psu.edu/cimbala/me433/Links/Table_A_9_CC_Properties_of_Air.pdf
- [40] Porovnání dvou období počasí v Chlumci nad Cidlinou. *Qpro* [online]. Chlumeck nad Cidlinou [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.qpro.cz/Porovnani-pocasi-v-Chlumci-nad-Cidlinou>
- [41] *Trubky* [online]. Tišnov [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.nerezmaterial.cz/index.php?str=produkty&k=trubky&r1=x15&r2=x1-t-5>
- [42] VAMPOLA, Josef. *Přestup tepla a tlakové ztráty při proudění plynu svazkem žebrovaných trubek*. Praha: SNTL, 1984. Technické příručky.
- [43] RECKNAGEL H., SPRENGER E., SCHRAMEK E.R.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2000. R. Oldenburg, Verlag GmbH, München 1999.
- [44] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. *Hodnoty součinitelů místních ztrát - zdroje tepla a základní tvarovky potrubí* [online]. In: . [cit. 2019-05-17]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/21-hodnoty-soucinitelu-mistnich-ztrat-zdroje-tepla-a-zakladni-tvarovky-potrubi>
-

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotka
a	Součinitel teplotní vodivosti	$\frac{m^2}{s}$
b	Počet řad vstupů do výměníku	—
c	Měrná tepelná kapacita	$\frac{J}{kg \cdot K}$
D	Celkový průměr žebrované trubky	m
d_1	Vnitřní průměr trubky	m
d_2	Vnější průměr trubky	m
d_e	Ekvivalentní průměr žebra	m
d_h	Hydraulický průměr	m
d_k	Délka kanálu	m
e	Délka trubky mezi výměníkem a rozváděcím potrubím	m
g	Rozměr obrátového oblouku – horizontální	m
h	Výška žebra	m
h'	Ekvivalentní výška žebra	m
h_x	Entalpie látky x	$\frac{J}{kg_{s.vz}}$
i	Rozměr obrátového oblouku – vertikální	m
j	Rozteč vstupního a výstupního otvoru obrátového potrubí	m
k	Součinitel prostupu tepla	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
m	Hmotnost látky	kg
\dot{m}	Hmotnost průtok	$\frac{kg}{s}$
m_k	Hmotnost kapalné voda	kg_{vody}
m_p	Hmotnost vodní páry	kg_{vody}
$m_{p;n}$	Hmotnost vodní páry při nasyceném stavu	kg_{vody}
m_t	Hmotnost tuhé vody (ledu)	kg_{vody}
m_w	Hmotnost vody ve vzduchu	$kg_v.$
n	Hmotnost odpařené/zkondenzované vody	$\frac{kg_{vody}}{h}$
n_1	Počet obrátových oblouků jedné trubky	—
n_2	Počet rozváděcích potrubí jedné trubky	—
$n_{1řad}$	Počet trubek v jedné řadě	—
n_k	Počet kolen jedné trubky	—
n_{vrstev}	Počet vrstev	—
n_{vst}	Celkový počet vstupů do výměníku	—
$n_{\dot{z}}$	Počet žebor na 1m trubky	—
Nu	Nusseltovo číslo	—
p	Tlak	Pa
P	Pomocný parametr 1	—
Pr	Prandtlovo číslo	—

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Q	Teplo	J
\dot{Q}	Tepelný tok	$\frac{J}{s} = W$
\dot{Q}_k	Tepelný tok uvolněný při kondenzaci vodní páry	W
Q_{om}	Teplo na ohřev materiálu	W
Q_{os}	Teplo na ohřev sušárny	W
Q_{vyp}	Teplo spotřebované v sušárně na odpaření 1 kg vody	$\frac{J}{kg}$
$Q_{vyp.vody}$	Skupenské teplo vody	J
r	Počet mezer na 1 m trubky	—
R	Pomocný parametr 2	—
Re_{de}	Reynoldsovo číslo	—
r_k	Poloměr kolene potrubí	m
S	Požadovaná plocha výměníku	m^2
s_1	Rozteč 1	m
S_1	Vnitřní teplosměnná plocha trubky na 1 m trubky	m^2
s_2	Rozteč 2	m
s_3	Rozteč 3	m
S'	Celková teplosměnná plocha na žebrované straně výměníku na 1 m trubky	m^2
S_p	Nejmenší průtočný průřez výměníku	m^2
S_{skut}	Skutečná plocha výměníku	m^2
S_t	Plocha trubky mezi jednotlivými žebry na 1 m trubky	m^2
S_z	Plocha žebor na 1 m trubky	m^2
\check{s}_k	Šířka kanálu	m
t	Teplota	$^{\circ}C$
u	Mezera mezi žebry	m
$usek1$	Část potrubí, ve kterém se nachází voda	—
$usek2$	Část potrubí, ve kterém se nachází pára	—
v	Rychlost vzduchu v nejužším průtočném průřezu	$\frac{m}{s}$
V	Objem vzduchu	m^3
w	Hmotnost obsažené vody	kg_{vody}
\dot{w}	Hmotnostní průtok vody	$\frac{kg_{vody}}{s}$
\dot{W}_1	Hmotnostní průtok odpařené vody	$\frac{kg_{vody}}{s}$
\dot{W}_2	Hmotnostní průtok zkondenzované vody	$\frac{kg_{vody}}{s}$
X	Měrná vlhkost vzduchu	$\frac{kg_{vody}}{kg_{s.vz}}$
X_d	Měrná vlhkost dřeva	$\frac{kg_{vody}}{kg_{sušiny}}$
$\bar{\alpha}$	Střední zdánlivý součinitel přestupu tepla	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
α_1	Součinitel přestupu tepla v trubce	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\alpha_{\dot{z}}$	Součinitel přestupu tepla na ekvivalentním průměru žebra	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
β	Koeficient pro výpočet účinnosti žebra	m^{-1}
Δp	Tlaková ztráta/ změna tlaku	Pa
Δt	Změna teploty	K
$\overline{\Delta t}$	Střední logaritmický teplotní spád	$^{\circ}C$
$\delta_{m\dot{z}}$	Mezera mezi žebry jednotlivých trubek v řadě	m
δ_p	Tloušťka přepážky	m
$\delta_{p\dot{z}}$	Vzdálenost posledního žebra od přepážky	m
δ_t	Tloušťka stěny trubky	m
$\delta_{\dot{z}}$	Tloušťka žebra	m
$\eta_{\dot{z}}$	Účinnost žebra	—
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\frac{W}{m \cdot K}$
λ_m	Součinitel tepelné vodivosti vybraného materiálu	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_{tř}$	Součinitel tření	—
ν	Kinematická viskozita	$\frac{m^2}{s}$
ξ	Součinitel odporu/ místní ztráta	—
ρ	Hustota	$\frac{kg_{v.vz}}{m^3}$
Φ	Absolutní vlhkost vzduchu	$\frac{kg_{vody}}{m^3}$
φ	Relativní vlhkost vzduchu	%
φ	Součinitel pro výměníky tepla s křížovým proudem	—

Indexy	Legenda
0	Výstup z chladiče
1	Výstup z prvního tepelného výměníku, který ohřívá médium
1'	Výstup z druhého tepelného výměníku, který ohřívá médium
1''	Výstup ze třetího tepelného výměníku, který ohřívá médium
2	Výstup ze sušárny
c	Celkové
ch	Chladivo
in	Druhé médium vstupující do výměníku
k	Koleno (potrubí)
komb.	Kombinace protiproudu, souproudu apod.
kond	Kondenzát
okolí	Parametry vztahující se k okolnímu prostředí
o.oběh	Otevřený oběh
o.oběh.reg	Otevřený oběh s regenerací tepla a vody
out	Druhé médium vystupující z výměníku
p	Protiproud
pára	Parametry páry

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

s	Pokud je napsáno u teploty, jedná se o sou proud. U ostatních se jedná o sušiny/ vzduch bez vlhkosti (suchý vzduch).
u.oběh	Uzavřený oběh
v	Vlhký materiál/vzduch
voda	Parametry vody
voda-pára	Jedná se o celkový úsek, ve kterém je voda i pára (platí pro jedno potrubí)
vst	Vstup (například do rozváděcího potrubí)
výst	Výstup (například z rozváděcího potrubí)
vz	Vzduch
vz.stř	Parametry vzduchu jsou vztaženy ke střední hodnotě
z	Ztráty

Zkratka	Legenda
KJ	Kogenerační jednotka
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
TČ	Tepelné čerpadlo
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor

Seznam obrázků

Obr. 1 Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti [1]	12
Obr. 2 Mollierův diagram [8].....	16
Obr. 3 Komorová sušárna [12].....	19
Obr. 4 Technologické schéma pásové sušárny [10].....	20
Obr. 6 Rotační bubnová sušárna [18].....	21
Obr. 5 Typy vestavby bubnové sušárny [18]	21
Obr. 7 Fluidní sušárna [21]	23
Obr. 8 Části roštového ohniště [25]	27
Obr. 9 Kotel zplyňovací a automatický [26].....	28
Obr. 10 Kombinovaný velkoprostorový kotel [27].....	29
Obr. 11 Kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem [28]	30
Obr. 12 Princip kogenerační jednotky se spalovacím motorem [30].....	31
Obr. 13 Mikroturbína [31]	32
Obr. 14 Stirlingův motor [32]	33
Obr. 15 Pístový parní stroj [33]	34
Obr. 16 Schéma tepelného čerpadla [34]	36
Obr. 17 Schéma komorové sušárny řeziva se slunečním kolektorem [35].....	37
Obr. 18 Skleníková sušárna [36].....	37
Obr. 19 Schéma komorové sušárny s otevřeným oběhem	40
Obr. 20 Schéma komorové sušárny s uzavřeným oběhem	41
Obr. 21 Schéma komorové sušárny s otevřeným oběhem	42
Obr. 22 Schéma tepelného výměníku – chladiče	43
Obr. 23 Schéma bubnové sušárny	44
Obr. 24 Schéma bubnové sušárny.....	45
Obr. 25 Schéma tepelného čerpadla.....	46
Obr. 26 Schéma komorové sušárny a tepelného čerpadla	47
Obr. 27 Schéma komorové sušárny s tepelným čerpadlem a tepelným výměníkem.....	52
Obr. 28 Komorová sušárna společně s bubnovou sušárnou a kogenerační jednotkou	55
Obr. 29 Žebrovaná trubka	63
Obr. 30 Vystřídání uspořádání žebrovek.....	65
Obr. 31 Kombinované proudění ve výměníku tepla	70
Obr. 32 Součinitel ϕ pro výměníky tepla s křížovým proudem [37]	71
Obr. 33 Převáděcí potrubí – oblouk	74
Obr. 34 Vstupní hrdlo s odvodem kondenzátu a s prvky rovnoměrně rozdělující proud	77
Obr. 35 Detail žebrované trubky.....	77
Obr. 36 Obrátové potrubí	77
Obr. 37 Potrubní rozdělovač	78
Obr. 38 Tepelný výměník se vstupy a výstupy	78
Obr. 39 Detail rozváděcích a obrátových potrubí	78
Obr. 40 Kompletní sestava s otevřenou boční stěnou pro čištění výměníku	79
Obr. 41 Základní pohled na tepelný výměník - nárys.....	80

Obr. 42 Bokorys	80
-----------------------	----

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Doba sušení u 25 mm silného řeziva při sušení na volném vzduchu	14
Tab. 2-1 Maximální nasycení vzduchu vodní parou při atmosférickém tlaku [7]	16
Tab. 6-1 Zimní období - průměrné hodnoty okolí 1.12.2017 - 1.1.2018.....	60
Tab. 6-2 Jarní období – průměrné hodnoty okolí 1.4.2018 - 1.5.2018.....	60
Tab. 6-3 Letní období - průměrné hodnoty okolí 1.7.2018 - 1.8.2018.....	61
Tab. 6-4 Letní období - průměrné hodnoty okolí 1.7.2018 - 1.8.2018 + výměník tepla.....	62
Tab. 7-1 Parametry žebrované trubky [37], [41].....	64
Tab. 7-2 Vystřídání uspořádání žebrovek.....	65
Tab. 7-3 Parametry výměníku	66
Tab. 7-4 Vlastnosti vzduchu v tepelném výměníku [7],[39].....	67
Tab. 7-5 Teploty jednotlivých médií v tepelném výměníku.....	70
Tab. 7-6 Hustoty chladiva v tepelném výměníku.....	73
Tab. 7-7 Součinitel místních ztrát ξ_k [-] pro koleno [44].....	74

Seznam grafů

Graf 1 Závislost změny celkového tlaku na poměru délky úseku vody a úseku páry	76
---	----
