

# Optimalizace a konstrukce sušičky jader

Bc. Ondřej Prajs

---

Diplomová práce  
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej Prajs  
Osobní číslo: T20841  
Studijní program: N0788A270002 Výrobní inženýrství  
Specializace: Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů  
Forma studia: Kombinovaná  
Téma práce: Optimalizace a konstrukce sušičky jader

## Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Popis stávajícího řešení sušičky jader.
3. Optimalizace sušícího procesu.
4. Konstrukce sušičky jader.
5. Ekonomické zhodnocení.

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

MORES, Antonín a Milan NĚMEC. Technologická zařízení sléváren. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 158 s. ISBN 9788001044902.

CHRÁST, Jaroslav. Slévárenská zařízení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 256 s. ISBN 8072044567.

BROWN, John R. Foseco ferrous foundryman's handbook. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000, (x, 360 p.). ISBN 9780750642842.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Ovsík, Ph.D.  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: 3. ledna 2022  
Termín odevzdání diplomové práce: 13. května 2022

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.  
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.  
ředitel ústavu

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Cílem práce je vypracovat studii na téma sušení jader ve slévárenském průmyslu. V první části popisují samotnou technologii výroby jader a její vlivy v kontextu celé slévárny jako výrobního celku. Následně přecházím k fyzikálnímu popisu sušicího procesu a technickému rozdělení sušiček, zejména se zaměřuji na jejich konstrukční koncept. Teoretické poznatky následně využívám k posouzení stávajícího systému sušení jader ve výrobním závodě Slévárny Kuřim. Následně navrhuji konstrukci nové sušičky jader typu páternoster a popisují jednotlivé konstrukční sestavy. Sušárna je navržena za účelem navýšení kapacit, které umožní přechod z lihem ředitelných nátěrových hmot na vodou ředitelné. Důvody k implementaci navrhované sušičky podkládám výpočtem provozních nákladů, z který jasně vyplývá, že realizace projektu dává smysl. Práce může sloužit jako podklad pro slévárny při výběru technologie sušení jader, potažmo jako konstrukční vzor pro firmy, které se zabývají výrobou strojních zařízení.

Klíčová slova: Slévárenství, jádra, žáruvzdorné nátěry, sušení, sušárna, tepelná bilance

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is focused on drying processes of cores for nodular and grey castings industry. The target of this thesis is to carry out research mainly focused on drying processes of sand cores. In first part I describe the core production and technological process itself and its effects in the context of the foundry as a production unit. This is followed by a description of the physical drying process and classification of dryers, focusing in particular on their design concept. The theoretical knowledge is then used to assess the existing core drying system in the production plant of the Kuřim Foundry. Subsequently, the design of a new elevator core dryer is proposed and the individual structural assemblies are described. The drying plant is designed to increase the capacity to enable the changeover from alcohol heat-resistant paints to water heat-resistant paints. The rationale for implementing the proposed dryer is supported by the calculation of the operating costs, which clearly shows that the implementation of the project is feasible. The work can serve as a basis for foundries in the selection of core drying technology, hence as a design pattern for companies involved in the manufacture of machinery.

Keywords: foundry, cores, refractory coating, drying process, dryer, thermal balance

Rád bych poděkoval panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych rád poděkoval mému zaměstnavateli Slévárně Kuřim, za poskytnutí přístupu k vybavení, díky kterému bylo možné zrealizovat měření. V neposlední řadě děkuji své rodině, která mě po čas mého studia podporovala.

„Vzdělání není naplnění vědra, ale zažehnutí plamene.“

William Butler Yeats

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 JÁDRA VE SLÉVÁRENSTVÍ</b> .....	<b>13</b>
1.1 JÁDROVÁ SMĚS.....	14
1.2 GRANULOMETRICKÉ VLASTNOSTI OSTŘIVA.....	15
1.3 VYBRANÉ METODY VÝROBY JADER.....	16
1.3.1 Metoda Croning .....	17
1.3.2 Metoda Hot-Box.....	17
1.3.3 Metoda Warm-Box.....	17
1.3.4 Metoda Cold-Box.....	18
1.3.5 Metoda využívající ST směsi .....	18
1.4 VLIV INTERAKCÍ KOV - PÍSKOVÁ FORMA NA POVRCHOVOU VRSTVU ODLITKŮ .....	19
1.4.1 Mechanismy penetrace.....	19
1.4.2 Popis povrchových vad způsobených penetrací.....	21
1.5 POUŽITÍ NÁTĚROVÝCH HMOT JAKO PREVENCE VZNIKU POVRCHOVÝCH VAD.....	21
1.5.1 Požadavky na ochranné vlastnosti nátěrů .....	22
1.5.2 Složení žáruvzdorných nátěrových hmot .....	22
1.5.3 Kvalitativní požadavky na jádra k založení v souvislosti s nátěry.....	24
<b>2 SUŠENÍ</b> .....	<b>26</b>
2.1 PRINCIP SUŠENÍ .....	26
2.2 SUŠICÍ PROCES.....	27
2.2.1 Počáteční úsek sušení .....	28
2.2.2 Úsek stále rychlosti sušení .....	28
2.2.3 Úsek klesající rychlosti sušení .....	29
2.2.4 Podmínky sušicího procesu.....	29
2.3 VLHKÝ VZDUCH – ZÁKLADNÍ VÝPOČTOVÉ VZTAHY – DEFINICE VELIČIN .....	29
2.3.1 Ideální plyn – stavová rovnice .....	30
2.3.2 Daltonův zákon parciálních tlaků.....	30
2.3.3 Teplota vlhkého teploměru .....	31
2.3.4 Teplota rosného bodu .....	31
2.3.5 Relativní vlhkost .....	31
2.3.6 Měrná vlhkost.....	31
2.4 MOLLIERŮV H - X DIAGRAM .....	32
2.5 ZÁKLADNÍ PROCESY ZMĚN STAVŮ VZDUCHU.....	33
2.5.1 Ohřev vzduchu .....	33
2.5.2 Chlazení vzduchu .....	34
2.5.3 Vlhčení vzduchu.....	36
2.6 PŘENOS VLHKOSTI KONVEKČÍ .....	37
2.6.1 Koeficient přestupu tepla a hmoty při nucené konvekci.....	37



<b>3</b>	<b>BILANCE SUŠÁRNY</b> .....	<b>41</b>
3.1	MATERIÁLOVÁ BILANCE .....	41
3.2	ENTALPICKÁ BILANCE .....	42
<b>4</b>	<b>PŘEHLED SUŠÁREN</b> .....	<b>44</b>
4.1	KONVEKTIVNÍ SUŠÁRNY .....	45
4.1.1	Komorová sušárna .....	45
4.1.2	Tunelová sušárna .....	47
4.1.3	Kondenzační sušárna .....	48
4.1.4	Páternosterová sušárna .....	49
4.1.5	Bubnová sušárna .....	50
4.1.6	Proudová sušárna .....	51
4.1.7	Fluidní sušárna .....	51
4.1.8	Rozprašovací sušárna .....	52
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>STÁVAJÍCÍ SUŠIČKY JADER</b> .....	<b>56</b>
6.1	POPIS PRACOVISTĚ .....	57
6.2	KONSTRUKCE STÁVAJÍCÍCH SUŠIČEK .....	58
6.3	MĚŘENÍ HNOTNOSTNÍHO ÚBYTKU VLHKOSTI VODNÍHO NÁTĚRU .....	59
6.3.1	Zkušební jádro .....	59
6.3.2	Odstranění dimethylisopropylaminu ze zkušebních vzorků .....	59
6.3.3	Příprava žáruvzdorného nátěru .....	60
6.3.4	Měření úbytku hmotnosti v průběhu sušicího procesu .....	60
6.3.5	Stanovení sušicí křivky .....	62
6.3.6	Kontrola kvalitativních požadavků nátěrových hmot .....	63
6.4	MĚŘENÍ HNOTNOSTNÍHO ÚBYTKU VLHKOSTI LIHOVÉHO NÁTĚRU .....	65
6.4.1	Stanovení sušicí křivky .....	66
6.5	SUMARIZACE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....	66
<b>7</b>	<b>NAVRŽENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>67</b>
7.1	KONSTRUKCE PÁTERNOSTEROVÉ SUŠÁRNY .....	68
<b>8</b>	<b>VÝPOČET HUSTOTY VLHKOSTNÍHO TOKU</b> .....	<b>74</b>
8.1	STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ .....	74
8.2	STANOVENÍ HUSTOTY VLHKOSTNÍHO TOKU PŘI PLNÉM VÝKONU SUŠÁRNY .....	75
<b>9</b>	<b>OPTIMALIZACE SUŠÍHO PROCESU</b> .....	<b>78</b>
9.1	SUMARIZACE OPTIMALIZAČNÍCH PARAMETRŮ .....	81
<b>10</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ</b> .....	<b>83</b>
<b>11</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>84</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>85</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>86</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>89</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>91</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>93</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>94</b>

## ÚVOD

S nástupem nového milénia, kdy zprísňovanie podmínek na ochranu životního prostředí akceleruje a stává se stěžejním tématem v každém odvětví průmyslu včetně slévárenství, je nezbytné si klást otázku, jak můžeme přispět k tomuto nastolenému trendu. Vlivem zprísňení legislativy BOZP se v praxi upouští od používání lihem ředitelných nátěrových hmot a nahrazují se látkami, které se ředí vodou. Tato na první pohled malá, dílčí změna technologie může zkomplikovat výrobní proces a vyžádat si nezanedbatelné množství prostředků na inovaci strojního parku. Další problematikou, která zejména dnes rezonuje mnohem výrazněji než v letech minulých, je energetická náročnost a její vliv na zvyšování variabilních nákladů. Je tedy na místě v průběhu projektového řízení modernizace strojního parku klást důraz na spotřebu energií a volit technologii, která je energeticky nenáročná. Kromě environmentálních hledisek je každá inovace příležitostí pro zvýšení produktivity výrobního procesu. Při sestavování konceptu dané technologie je dobré dívat se dopředu a navrhnout řešení, které v budoucnu bude kompatibilní s nějakou formou automatizace. Jenom tak si zajistíme konkurenceschopnost a tím i svoji pozici na trhu.

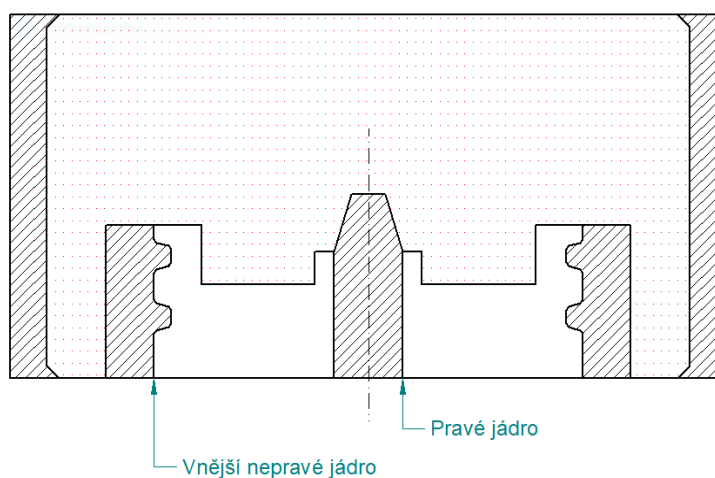
Ve své práci se zaměřuji na popis stávajících plynových konvektivních sušáren, které se používají na vysoušení jader po aplikaci nátěrových hmot. Sestavením sušicí křivky popisuji dynamiku sušicího procesu a následně konstatuji jejich energetickou spotřebu. Dále předkládám konstrukční návrh etážové průběžné konvektivní sušárny s odporovými otopy, jejíž výrobní kapacity následně počítám a optimalizuji. Metodika výpočtů a data pro stanovení kvalitativních požadavků vycházejí z teoretické části mé práce, kde provádím studii na téma jádra a jejich nátěry, sušicí proces a konstrukční rozdělení sušáren. Závěr práce pojednává o smysluplnosti implementace nové sušárny do provozu a je podložen kalkulací provozních nákladů.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 JÁDRA VE SLÉVÁRENSTVÍ

Slévárenské jádro je tvarové tělísko, které se vkládá do formy, aby vytvořilo dutinu v odlitku, jejíž tvarový negativ nelze vyformovat. Ve své podstatě se jedná o přepážku, která je umístěna na příslušné místo v kavitě formy a brání tak tavenině vyplnit danou část. Jádro může být jednoduchý kulatý válec potřebný k vytvoření otvoru v náboji kola, nebo může jít o velice sofistikovanou sestavu těles, která se používají k vytvoření chladícího okruhu bloku motoru, nebo chladících drážek těla elektromotorů. Slévárenská technologie je jedinečná tím, jak relativně snadno dokážeme vytvářet spletné dutiny ve výrobku za použití jader. [1]

Jádro se skládá ze dvou částí. Jedná se o tělo jádra a známku. Znamka může být jedna, nebo jich může být více. Znamky slouží k podepření a vymezení jádra ve formě a mohou také sloužit k odvádění plynů kumulujících se ve formě při odlévání. Jádra můžeme dělit na jádra pravá a jádra nepravá viz Obr. 1. Jádra pravá jsou po odlití celá obklopena taveninou a jádra nepravá jsou pouze z části obklopena taveninou a zpravidla tvoří vnější tvar odlitku.



Obrázek 1 Pravé a nepravé jádro

Jádra mohou být vyrobená z kovu, keramiky, sádky, ale nejčastěji se jádra vyrábí z jádrové směsi, která se skládá z ostřiva a pojiva. Jako ostřivo se především používá křemenný písek se specifickou velikostí středního zrna. Výběr správného pojiva závisí na technologii výroby jádra, ale jedná se ve své podstatě o umělé pryskyřice.

Jádro je nejvíce namáhanou součástí slévárenské formy a musí vykazovat dostatečnou pevnost při vysoké teplotě, aby odolalo hydrostatickým silám taveniny a kontrakcím,

vyvinutý smršťováním kovu při změně skupenství. Po odlití jádro degraduje, klesá jeho pevnost a je tak lehce odstranitelné z dutiny odlitku při vytloukání formy, popřípadě se zbytky jádra odstraní při vykonávání cidičských operací. [2]

## 1.1 Jádrová směs

Pro výrobu slévárenských jader se používá jádrová směs, která se skládá ze dvou základních komponent z ostřiva a pojiva. Ostřivo je zrnitý žáruvzdorný materiál, který tvoří částice s různou geometrií a velikostí a představují pevný fundament směsi. Z granulometrického pohledu se za ostřivo považují všechny částice, jejichž velikost přesahuje 0,02 mm. Podíl ostřiva ve formovací směsi se pohybuje mezi 90 % - 99,5 % hmotnosti směsi. Nejpoužívanějším ostřivem je  $SiO_2$ . Jako pojivo můžeme nazývat látku, potažmo skupinu látek, které vytvářejí vazbu mezi jednotlivými zrny ostřiva. Vzniklé vazby jsou závislé na velikosti adhezních a kohezních sil, které působí mezi částicemi. Vazby vznikají buď samovolně pozvolna při smíchání ostřiva a obou složek pojiva (u samotvrdnoucí směsi), nebo řízeně při zásahu fyzikálních, nebo chemických vlivů z vnějšího prostředí. Pojiva můžeme dělit na organická a anorganická. Jádrová směs může kromě výše zmíněných složek obsahovat také vodu, jílové části a další podpůrné látky. [3] [4] [5]

Stěžejním faktorem ovlivňujícím vlastnosti jádrové směsi je, jak spolu interaguje pojivo s ostřivem. Kompatibilita těchto dvou složek má přímý vliv na kvalitu povrchu výsledného odlitku, ale také na samotný průběh výrobního procesu. Vzhledem k rozmanitosti výrobních technologií a etap výrobního procesu slévárenských jader, jsou na vlastnosti jádrových směsi kladeny různé požadavky v průběhu jejich výroby. Při výrobě jader je stěžejní parametr vstřelovatelnost směsi a také jsou kladeny vysoké nároky na její homogenitu. Po vstřelení a vytvrzení musí mít jádro požadovanou manipulační pevnost. Při odlévání je nutné, aby jádro vykazovalo objemovou stálost, mechanickou pevnost za vysokých teplot, prodyšnost a žáruvzdornost. Na samém konci výrobního cyklu je podstatná rozpadavost jádra a to z důvodu potřeby směs regenerovat. [6] [5]

## 1.2 Granulometrické vlastnosti ostřiva

Granulometrická stavba ostřiva má kardinální vliv na vlastnosti jádrové směsi. Disperzita systému ostřiva je ovlivněna tvarem a rozložením částic písku a je definována níže uvedenými pojmy. [6] [7]

**Zrnitost:** Určuje se pomocí síťového rozboru a znázorňuje se pomocí součtové křivky zrnitosti. Pomocí součtové křivky zrnitosti můžeme určit stupeň rozpojení písku. [6] [7]

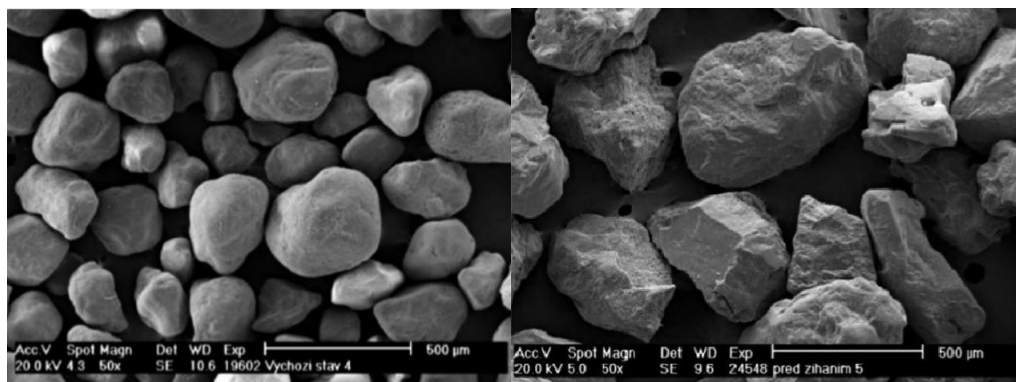
**Velikost částic:** Definujeme ji jako průměr myšlených kulových zrn, která mají stejný objem jako zrna skutečná, nebo jako průměr myšlených kulových zrn, která mají stejnou usazovací rychlost jako zrna skutečná. [6] [7]

**Střední velikost zrna  $d_{50}$ :** Jedná se o statistický průměr velikosti zrn. Jde o střední velikost zrna, které odpovídá velikosti ok síta, na kterých se zachytí 50 % ostřiva. Jedná se tedy o průměrnou zrnitost ostřiva. [6] [7]

**Číslo zrnitosti AFS:** Jedná se o bezrozměrnou hodnotu, která popisuje počet otvorů v síti na jeden palec čtvereční, kterými by prošel hypotetický písek za předpokladu, že by všechny zrna měla stejnou velikost. [6] [7]

**Číslo stejnosměrnosti:** Číslo je definováno jako podíl čísel  $d_{75}$  a  $d_{25}$ , které reprezentují velikost otvorů sít, na kterých bylo zachyceno 75 % a 25 % částic písku. Čím víc se tento poměr blíží k hodnotě 1, tím je ostřivo stejnosměrnější.

**Tvar a povrch zrna:** Slévárenské písky byly v průběhu své existence přenášeny vlivem přírodních jevů na velké vzdálenosti. Jedná se o přesun například vlivem vzduchu, činností vody atd. Při těchto procesech byla zrna různě devalvována, obrušována, tříděna a drcena. Písky dělíme dle tvaru zrna, hrany zrna, povrchu zrna a celistvosti zrna. Na obrázku číslo 2 je znázorněn tvar zrna z rozdílných nalezišť od různých dodavatelů. [6] [7]

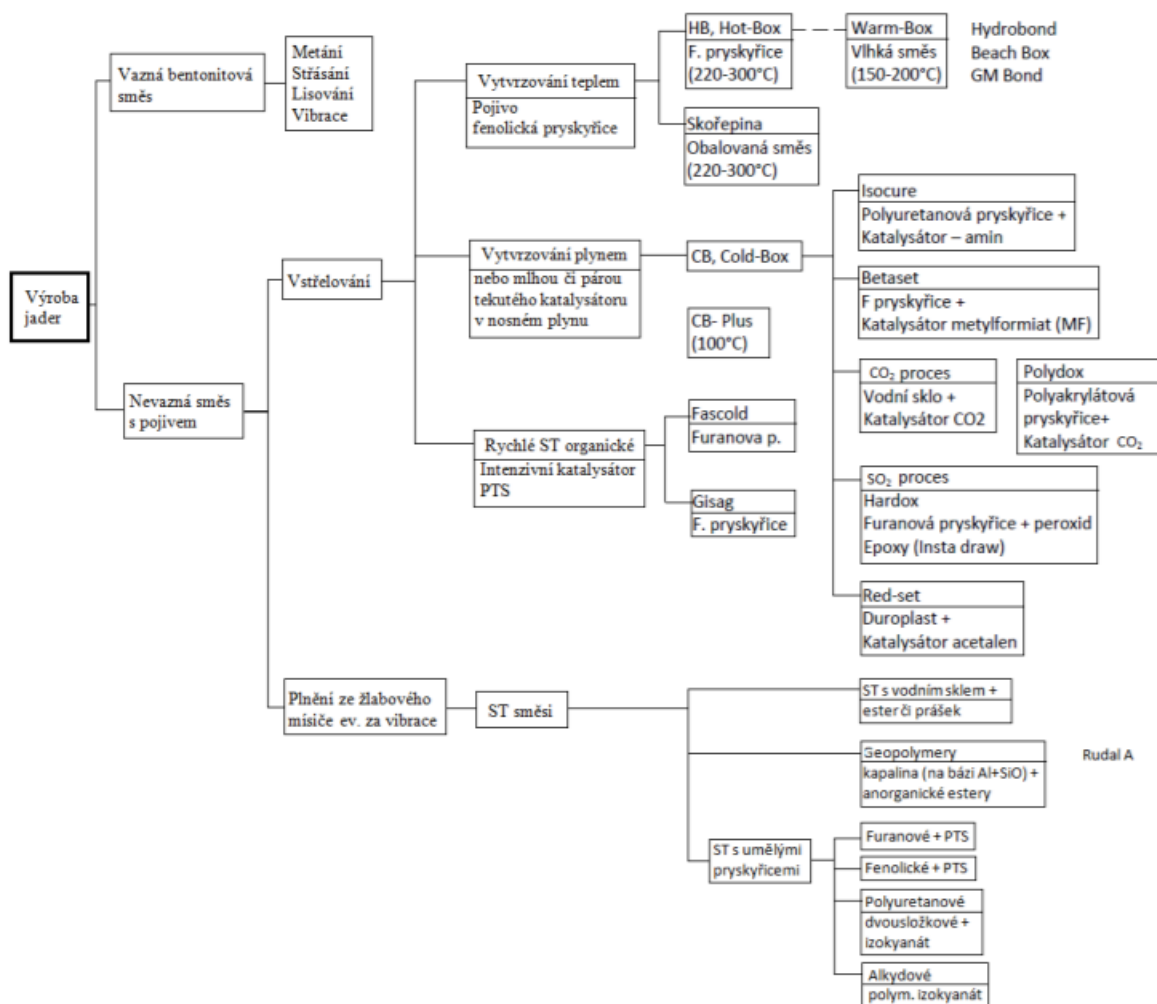


Obrázek 2 Tvar a povrch zrn ostřiva Šajdíkově Humence (vlevo) [8] Střeleč (vpravo) [9]

### 1.3 Vybrané metody výroby jader

Současné procesy výroby jader začaly v 50. letech 20. století. Dr. Lev Petržela vnesl do oboru slévárenství princip chemického vytvrzení směsi, kterou dnes nazýváme  $CO_2$ -proces. Tato technologie umožnila vyrábět jádra bez zdlouhavého sušení a bylo díky ní možné řídit vytvrzovací proces. [10]

V následujících letech se postupně vyvíjely technologie horkých procesů jako např. metoda Croning, Warm-Box, nebo Hot-Box. Díky progresu byly následně vyvinuty technologie studených procesů jako např. Cold-Box,  $SO_2$ -proces a Samotvrdnoucí (ST) směsi. Zejména metoda Cold-Box a ST směsi jsou dnes hojně využívány ve slévárenství. [11]

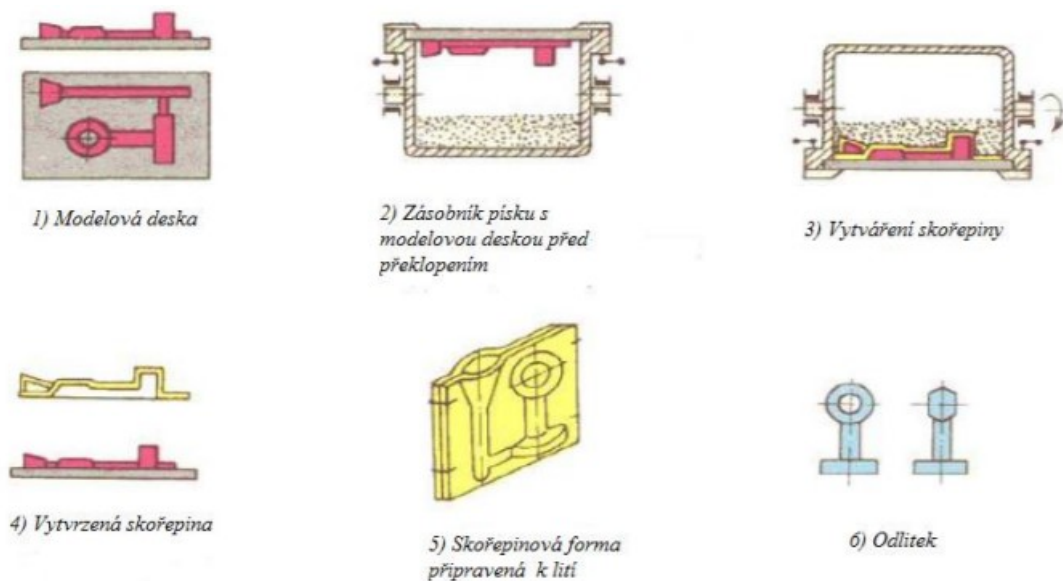


Obrázek 3 Metody výroby jader [11]



### 1.3.1 Metoda Croning

Jedná se o technologii skořepinového formování, díky které lze vyrábět tenkostěnná nebo dutá jádra. Ostrivo ve formě křemenného písku se smíchá s termoplastickou fenolformaldehydovou pryskyřicí, která je teplem tvrditelná. Princip výroby je znázorněn na obrázku číslo 4. Kovová modelová deska s kovovým modelem je vyhřívána na teplotu 150 °C – 300 °C. Následuje postřik emulzí, která brání přilepení směsi. Modelová deska se spojí se zásobníkem se směsí a otočí se. Pryskyřice na povrchu modelu taje, váže písek a vytváří skořepinu o tloušťce několika milimetrů.



Obrázek 4 princip metody Croning [12]

### 1.3.2 Metoda Hot-Box

Metoda horkých jaderníků produkuje jádra v kovových jadernících. Jádrová směs, která se skládá z ostriva a pojiva ve formě močovinoformaldehydové, furanové, nebo fenolformaldehydové pryskyřice, se vstřeluje do jaderníku, kde je následně vytvrzena teplem. Jaderník se běžně vyhřívá na teplotu 180 °C – 300 °C. Díky vysoké termoreaktivitě pojiv jsou jádra povrchově vytvrzena v řádu několika desítek sekund, a získají tak pevnost dostatečnou pro manipulaci.

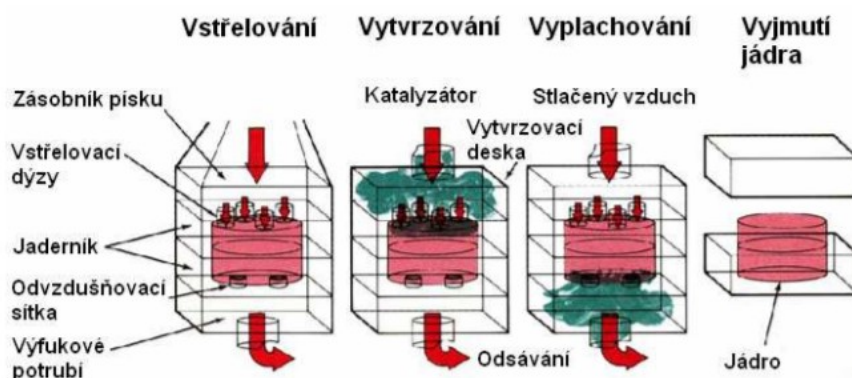
### 1.3.3 Metoda Warm-Box

Tato metoda je v podstatě shodná s technologií Hot-Box s tím rozdílem, že vytvrzovací teploty bývají o 70°C nižší. Doba potřebná k vytvrzení na manipulační pevnost je srovnatelná s metodou Hot-Box. Při této metodě se využívá modifikované furanové pryskyřice a speciálního tvrdidla na bázi solí kyseliny sulfonové. Potřebné množství pojiva

je menší než u metody Hot-Box a díky tomu vzniká méně škodlivých látek při odlévání. Jádra vyráběna touto metodou se vyznačují nižším sklonem k pórovitosti a dobrou rozpadavostí po odlití. Modifikované pojivo je cenově nákladnější a vyžaduje rychlé zpracování. [13]

### 1.3.4 Metoda Cold-Box

Jedná se o metodu, která byla vyvinuta koncem 60. let v USA a je dodnes uplatňována pro výrobu jader ve velkých sériích. Jedná se o metodu, která co do produktivity nemá konkurenci, a to obzvlášť v automobilovém průmyslu. V následujících 60 letech došlo k modernizaci této metody, což vedlo k pokroku v kvalitě pojiv, vytvrzovací technice, navýšení produktivity, lepší regeneraci písku, navýšení pevnosti a v neposlední řadě se proces stal ekologičtější. Jádrou směr tvoří ostřívo ve formě křemenného písku s umělou dvousložkovou pryskyřicí. Jelikož se jedná o vysoce produktivní metodu, směs se dávkově připravuje v rychlomísících a je cyklicky dávkovaná do násypky vstřelovacího stroje. Směs je pod tlakem vstřelena do jaderníku, kde je následně profouknuta parou tekutého katalyzátoru ve formě aminu. Katalyzátor musí při vytvrzování pronikat celým jádrem od vstřelovací dýzy až po odvzdušňovací sítko. Reakcí katalyzátoru s pryskyřicí vzniká polyuretan, jedná se o reakci, která je velmi rychlá (v řádu sekund). Jelikož je amin jedovatý, toxický a smíchaný se vzduchem tvoří výbušnou směs, jsou vstřelovací stroje vybaveny odsávacím zařízením a neutralizační stanicí. [11]



Obrázek 5 Metoda Cold-Box [11]

### 1.3.5 Metoda využívající ST směsi

Jedná se o metodu, při které dochází k tvrdnutí směsi za studena, bez ohřevu a to od okamžiku smíchání pojiva s tvrdidlem. Jedná se o technologii pro malosériovou výrobu velkých a těžkých jader. ST směs získává požadované vlastnosti chemickým, nebo

fyzikálně - chemickým procesem uvnitř pojivové soustavy bez zásahu zvenčí. Tato metoda umožňuje rychlou a snadnou výrobu, vysokou rozměrovou přesnost a zajišťuje kvalitní povrch výsledného odlitku. Nevýhodou je vysoká cena pojiv a nutnost rychlého zpracování, dále také problémy s ekologií. Jako pojivo se obvykle používá furanová pryskyřice a jako tvrdidlo kyselina paratoluensulfonová. Směs se plní do otevřených jaderníků za pomoci žlabových mísičů. Zhutnění jádrové směsi probíhá pomocí vibračního stolu, který je součástí linky. Manipulační pevnost hmotnějších jader nastává v řádu minut. [11]

#### **1.4 Vliv interakcí kov - písková forma na povrchovou vrstvu odlitků**

Výroba jakostních odlitků vyžaduje, aby byl povrch odlitku hladký a bez povrchových vad. Jedním ze základních aspektů, který zapříčiňuje povrchové vady, je mechanismus, při kterém penetruje kov do slévárenské formy nebo jádra za vzniku nežádoucích produktů na tomto rozhraní. Výsledkem reakcí na výše zmíněném rozhraní, v závislosti na stupni proniknutí kovu do písku, mohou být vady jako připečeniny, zapečeniny a v neposlední řadě povrchová drsnost. Tyto vady mají významný vliv na snížení mechanických vlastností odlitků, zvláště pak na únavovou životnost. [14]

Povrchové vady způsobují velké finanční ztráty za neshodnost odlitků, potažmo za jejich opravné práce. Studie uvádí, že třída vad povrchu se dle podílů na neshodnosti celkové produkce nachází na až čtvrtém místě, nicméně co se týče nákladů na vícepráce, je tato třída vad na prvním místě, a proto je nezbytné se touto problematikou zabývat a hledat způsoby, jak jim preventivně předcházet. [15]

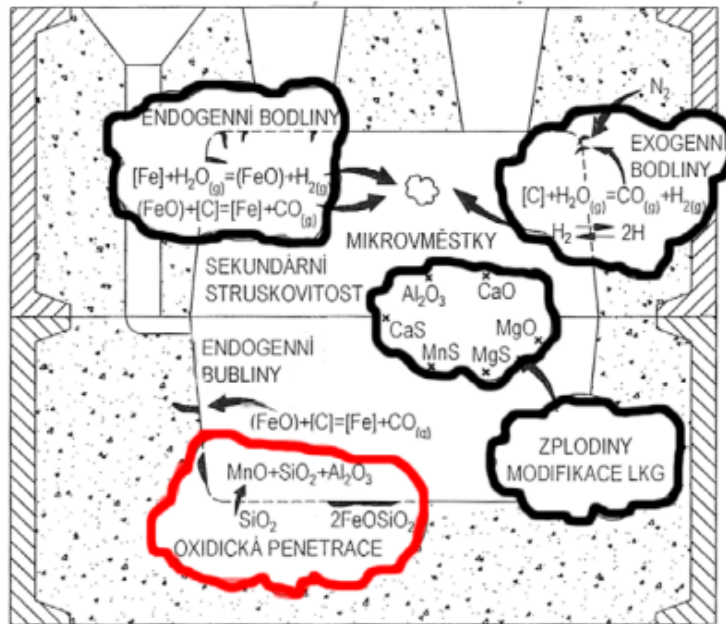
##### **1.4.1 Mechanismy penetrace**

Níže jsou uvedeny a popsány vybrané mechanismy, které mají vliv na vznik penetrace kovu do formy.

Mechanická penetrace: Kov může vstupovat do prostoru pórů ve formě za působení metalostatického, metalodynamického tlaku nebo působením kapilárních sil.

Proces pronikání kovu do pórů formy není děj plynulý, ale probíhá skokově. Tavenina vnikne do póru s nízkou teplotou a ztuhne, čímž se zvýší tepelná vodivost zapečetiny, která přijme i latentní teplo krystalizace. Forma se ohřeje, kov se znovu roztaví a pronikne do větší hloubky. Tyto skoky se postupně zkracují. [16]

Chemická penetrace: Při styku slitin železa s kyslíkem během odlévání na vzduchu se oxidují všechny prvky, které mají za daných podmínek vyšší afinitu ke kyslíku, než železo. Důsledkem oxidace se tvoří pevné, tekuté a plynné produkty, které mohou reagovat s formou za vzniku různých povrchových i vnitřních vad, jejichž schéma je znázorněno na obrázku 6. [17]



Obrázek 6 Oxidační procesy ve formě a její důsledky [15]

Explozivní penetrace: Tento druh penetrace vzniká v místech, ve kterých dochází k rychlému zaplnění formy kovem. Jedná se o explozivní odpaření vody, které způsobí dynamický ráz, který na velkých plochách zatlačí kov do póru formy. [17]

Expanzivní penetrace: Vzniká pouze u grafitizujících litin. Během eutektického tuhnutí, způsobeného nižší měrnou hmotností vznikajícího grafitu, dochází k významné expanzi. Roztahující se materiál vyvolává na stěnu formy tlak a může způsobit rozsáhlé penetrace kovu do formy. [15]

Existuje dalších mnoho způsobů, jak tavenina může penetrovat do formovací (jádrové) směsi, ale jedná se o složité procesy, jejichž popsání vyžaduje značnou odbornost a navíc to není účelem této práce.

#### **1.4.2 Popis povrchových vad způsobených penetrací**

Drsný povrch: Jedná se o hrubý povrch odlitku způsobený dokonalým smočením jádra nebo formy kovem do hloubky poloviny průměru zrna ostřiva. Vrstva písku, která je přilehlá na povrchu odlitku, se relativně snadno odděluje, způsobuje ovšem výraznou drsnost. [15]

Povrchové připečeniny: Jedná se o tenkou vrstvu písku, která se často vyskytuje na rovných plochách s nejvyšší teplotou odlitku. Kov penetruje do větší hloubky, než je průměr zrna ostřiva. Odstranění připečenin je náročné a lze ho dosáhnout opakovaným tryskáním a broušením. [15]

Hluboké připečeniny – zapečeniny: Tato vada se projevuje jako tenká vrstva nataveného písku, který je pevně ve styku s odlitkem. Povrch má sklovitý vzhled a může být posetý d'olíčky. Kov může penetrovat do značné hloubky i několika centimetrů. Pórovitý konglomerát písku a kovu vzniká v silně tepelně exponovaných místech formy potažmo jádra. [18]

#### **1.5 Použití nátěrových hmot jako prevence vzniku povrchových vad**

Žáruvzdorné slévárenské nátěry jsou variantou, jíž lze zamezit podmínkám pro vznik povrchových vad a dosáhnout vyšší jakosti povrchu odlitku. Hlavní podmínkou jejich funkce je přítomnost látek, které budou příznivě ovlivňovat termo – mechanicko -chemické procesy probíhající, na fázovém rozhraní tavenina - forma (jádro), tj. potlačovat penetraci taveniny do póru formovací směsi. [17] Nároky na žáruvzdorné nátěry se dají shrnout do těchto bodů:

- Umožnit čisté oddělení odlitku od formy a jádra
- Zamezit vzniku povrchových vad
- Zvýšit jakost povrchu odlitku

Významnou aspektem při volbě žáruvzdorných nátěrových hmot je i ekologické hledisko jejich výroby, hygienické faktory v provozních podmínkách a také cena. Producenti uvádějí, že nesprávná volba nátěrů může vést ke zvýšení dodatečných nákladů na apreturu, či se projevit ve vyšší zmetkovitosti, jejíž podíl na výrobních nákladech může činit i 5 % - 10 %. [17]

### 1.5.1 Požadavky na ochranné vlastnosti nátěrů

Jak již bylo uvedeno výše, vrstva nátěru je při plnění formy kovem a jeho tuhnutím vystavena složitým termo-mechanicko-chemickým vlivům, které jsou zapříčiněny působením roztaveného kovu, účinkem formovací směsi a vlastním působením nátěru. Ochranného účinku nátěru dosáhneme za předpokladu splnění níže definovaných kritérií.

- Vznik souvislé inertní bariéry na rozhraní forma - kov, která zabrání průniku taveniny a jejích par do formy (jádra)
- Zacpání pórů v pískovém podkladu
- Vytvoření ochranného plynového polštáře a zabezpečení redukční atmosféry na rozhraní forma - tavenina
- Snížení smáčivosti povrchu formy taveninou
- Vytvoření mezivrstev a hustě tekoucích strusek na rozhraní forma - tavenina
- Oboustranná nereaktivnost

### 1.5.2 Složení žáruvzdorných nátěrových hmot

Jedná se o několikasožkové heterogenní systémy, jejichž podstatu tvoří především suspenze jemnozrnných žáruvzdorných pigmentů (plniva) v nosné kapalině, která vytváří izolační vrstvu nereagující s taveninou. V nosné kapalině jsou dále rozpuštěna pojiva a jiné látky upravující vlastnosti nátěru jako např. smáčedla, antisedimentační přísady a podobně. Složení nátěrových hmot musí být vždy přizpůsobeno dané technologii.

Plniva: jsou rozhodující složkou nátěrů. Jejich složení musí být přizpůsobeno konkrétní technologii a příslušným licím podmínkám. Je nutné vybírat plniva na základě druhu odlévané slitiny a složení formovací směsi. Plniva nesmí reagovat s taveninou a jejími legujícími prvky a současně nesmí reagovat s ostřivem a ostatními složkami formovací směsi. Plniva jsou jemnozrnné žáruvzdorné anorganické materiály. Nejčastěji se jedná o různé druhy oxidů, karbidů, nitridů a boridů. V tabulce 1 jsou uvedeny nejčastěji používané žáruvzdorné plniva. [19]

Plnivo	Značka	Hustota [g.cm <sup>3</sup> ]	Teplota tavení [°C]	Použitelnost
Křemičitan zirkoničitý	$ZrSiO_4$	4,67	2200	Litiny, oceli – nevhodné pro manganové oceli
Magnezit	$MgCO_3$	3,0	2800	Litiny, oceli – zejména pro manganové oceli
Oxid hlinitý	$Al_2O_3$	3,97	2050	Litiny, oceli
Olivín	$(Mg, Fe)_2[SiO_4]$	3,3	1760	Litiny
Mastek	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	2,58 - 2,83	1500	Litiny, neželezné kovy
Křemen	$SiO_2$	2,6	1710	Litiny
Grafit	C	2,1-2,3	1000-3500	Litiny, neželezné kovy

Tabulka 1 Žáruvzdorná plniva [19]

Nosná kapalina: žáruvzdorné nátěrové hmoty je možné kategorizovat na základě různých kritérií. Velmi často používaný parametr třídění je druh nosné kapaliny (nosiče). Z tohoto hlediska dělíme nátěry na vodou ředitelné a bezvodné. Jak již z názvu vyplývá, základní funkcí nosné kapaliny je rozpouštění přísadových látek, tj. pojiva a další příměsi a zároveň slouží jako médium k transportu plniv na povrch formy (jádra). [17]

Nátěry na vodní bázi mají řadu nevýhod. Z ekonomického hlediska se především jedná o dlouhou dobu odpařování vody. Je tedy nezbytné zahrnout do výrobního procesu vysoušení. Další nevýhodou je vyšší riziko vzniku povrchových vad, při odlévání vzniká ve formě oxidická atmosféra a následkem vlhkosti se může snižovat povrchová pevnost formy (jádra). Neoddiskutovatelnou výhodou vodou ředitelných nátěrových hmot je její ekologičnost, hygieničnost a bezpečnost. Z uvedených důvodů význam těchto nátěrů neustále roste. [17]

Bezvodné nátěry obvykle uvedené nevýhody nemají. Rychle schnou a dají se vysoušet a zpevnit zapálením. V praxi se využívá zapalování forem (jader) jen v případech, kdy je vzhledem k produkci nedostatek času. Obvykle i u těchto nátěrů je nutné implementovat do výrobního procesu vysoušecí proces, ovšem čas potřebný k vysušení formy (jádra) je významně redukován. Hlavními nedostatky jsou především hygienická závadnost a nízká bezpečnost. Jako organická rozpouštědla se používají např. benzín, líh a metanol. [17]

Pojiva: jedná se o složky, které po odpaření nosné kapaliny dodávají nanesené vrstvě pevnost a to i za vysokých teplot. Volba pojiva se odvíjí od zvolené nosné kapaliny. U nátěrů na vodní bázi se používají organické látky jako např. dextrin, melasa, škrob a močovinoformaldehydová pryskyřice. U bezvodných nátěrů se používají syntetické pryskyřice jako např. fenolformaldehydová a fenolfuranová pryskyřice. Jedním

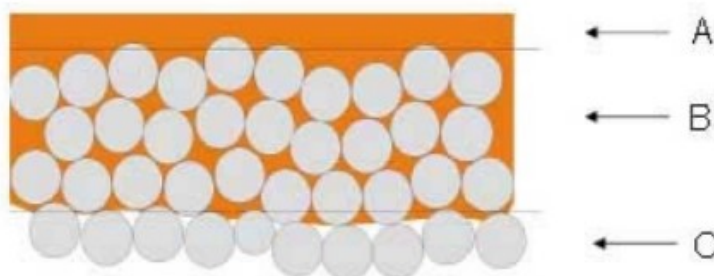
z vedlejších účinků pojiv je jejich pyrolitický rozklad při styku s taveninou. Při kontaktu s taveninou vznikají pevné produkty jako uhlík, který díky své nesmáčenlivosti snižuje sklon k penetraci taveniny do formy. Dále vznikají plynné látky, které vytváří ochrannou atmosféru na rozhraní forma - tavenina, která také snižuje penetraci taveniny do formy. [17]

Přísadové látky: jedná se o látky, které obecně zlepšují některé technologické vlastnosti nátěrů. V případě potřeby mohou být přidávána např. smáčedla, odpěňovadla, stabilizátory a podobně.

### 1.5.3 Kvalitativní požadavky na jádra k založení v souvislosti s nátěry

Předtím, než je jádro založeno do formy, by mělo splňovat základní kvalitativní parametry, které mají přímou souvislost se vznikem povrchových vad. Prvním a stěžejním parametrem, alespoň v kontextu mé práce, je procentuální zastoupení vlhkosti ve svrchní vrstvě jádra. Dalším parametrem je minimální síla vrstvy nátěru po odpaření nosné kapaliny a hloubka penetrace nátěru do jádrové směsi.

Nátěr je nutné připravit tak, aby dokázal penetrovat do pórů jádra, ale zároveň aby vytvořil povlak na povrchu jádra o určité tloušťce. Hloubka penetrace nátěru do jádra vyjadřuje míru jeho soudržnosti s povrchem nátěru. Dá se říct, že čím víc nátěr penetruje do pórů jádrové směsi, tím je soudržnější a tavenina ho při lití neporuší, ale na druhou stranu klesají mechanické vlastnosti. Optimální tloušťka vrstvy nátěru ležící zcela na povrchu po vysušení je 200  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ . Optimální hloubka penetrace by měla odpovídat 2 – 4 průměrům zrn ostřiva jádrové směsi. Řez lící vrstvy jádra (formy) opatřené vrstvou nátěru je znázorněn na obrázku 7. [17] [20]



Obrázek 7 Schéma řezu lící vrstvou jádra: A – vrstva nátěru ležící na povrchu, B – penetrovaný nátěr do jádrové směsi, C – nepenetrovaná vrstva jádrové směsi [17]



Před založením jader do formy je nezbytné zajistit, aby svrchní vrstva nátěru obsahovala maximálně 0,4 % podílu vlhkosti. Jelikož mají aminy tendenci na sebe vázat vodu, je předpokladem pro udržení takového podílu vlhkosti správné skladování jader v místnosti s kontrolovaným klimatem, kde je udržován vzduch s malým podílem vlhkosti. Kontrola obsahu vlhkosti ve svrchní vrstvě se provádí za použití analyzátoru vlhkosti.

## 2 SUŠENÍ

Sušením se nazývá proces, u kterého dochází za pomoci tepelné energie ke snižování vlhkosti mokrého materiálu, který je definován jako směs absolutně suché látky a vody. Vodu odborně nazýváme kapalným adsorbátem a pevný materiál nazýváme adsorbentem. Adsorbátem myslíme látku, která je vázaná na fázovém rozhraní a adsorbent je pevná látka, která je na sebe schopna vázat různými silami látky z roztoku. Existují celkem tři vazby, jak na sebe hmota váže vlhkost. [21]

- Hydratační vazba – Je chemicky vazná a vlhkost je součástí molekul. Po odstranění vlhkosti na molekulární úrovni nelze opětovně vlhkost dodat. Jedná se tedy o nevratný proces.
- Kapilární vazba – Vlhkost vyplňuje mikro a makrokapilární prostory adsorbentu. Po odstranění vlhkosti dochází ke změnám vlastností adsorbentu (pružnost, tažnost).
- Adsorbovaná – Vlhkost vyplňuje velké prostory mezi vlákny materiálu.

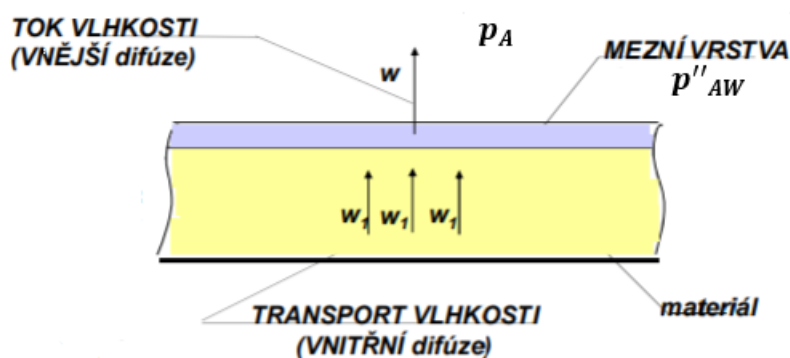
Abychom byli schopni odstranit vlhkost z materiálu, je nutné tyto vazby narušit. Narušení těchto vazeb vyžaduje dodání určité energie do procesu sušení.

### 2.1 Princip sušení

Sušení je ve své podstatě děj, při kterém simultánně dochází ke sdílení hmoty a tepla, jež jsou nezbytné k odpaření a transportu vody z materiálu. Z této definice se sušení nikterak neliší od vypařování, ale ve skutečnosti je sušení děj difúzní, jelikož vlhkost přechází do okolí povrchovým vypařováním vlhkosti a difúzí vlhkosti z vnitřních vrstev na povrch materiálu. Difúze je mechanismus, při kterém látky v prostředí se svou vyšší koncentrací mají tendenci přecházet do prostředí se svojí nižší koncentrací a postupně tak v celém systému vyrovnají svoji koncentraci. Průběh sušení je především stanoven odporem difúze odstraňované kapaliny. K nepřetržitým vypařování vlhkosti dochází vlivem difúze páry z povrchu do obklopujícího prostředí. Na povrchu sušeného materiálu se tvoří tzv. mezní vrstva, která se postupně sytí vodní párou, která dosáhne na základě vnitřních a vnějších podmínek tlaku  $p''_{AW}$  [MPa]. Obklopující prostředí obsahuje vlhké páry, jejichž tlak je roven  $p_A$  [MPa]. A právě diference tlaků vodní páry v obklopujícím prostředí a mezní vrstvě je hnací silou difúze a celého sušícího procesu. V souvislosti s hodnotami tlaků vodní páry v mezní vrstvě a obklopujícího prostředí může dojít ke třem stavům. Za

předpokladu, že  $p''_{AW} > p_A$  nastává tok vlhkosti z mezní vrstvy do vzduchu, tedy probíhá sušení. Pokud dojde ke stavu  $p''_{AW} < p_A$  pak nastává tok vlhkosti do materiálu a dochází k vlhčení. Za předpokladu, že  $p''_{AW} = p_A$  pak materiál dosáhl rovnovážné vlhkosti s obklopujícím prostředím. [21] [22]

Pro správný sušicí proces je významné, aby byla neustále a dostatečně sycena mezní vrstva vlhkostí. V případě, kdy u materiálu s velkým obsahem vnitřní vlhkosti může být rychlost vnitřní difúze vyšší než rychlost vnější difúze do obklopujícího prostředí, je tedy řídicí a limitní. [23]

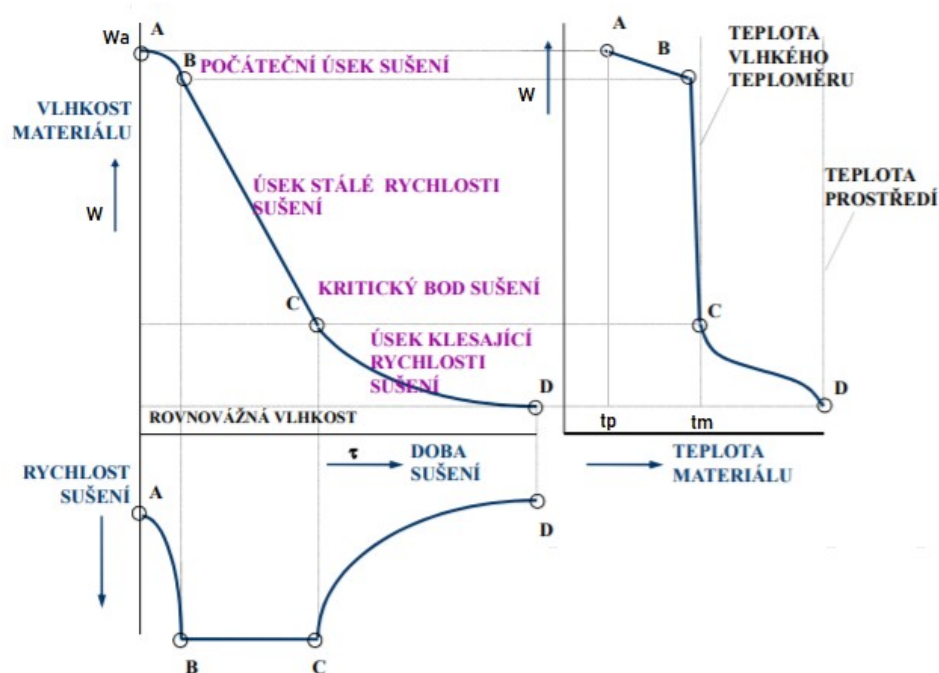


Obrázek 8 Tok vlhkosti difúzí [24]

Sušení se provádí v sušárnách. Z pohledu sdílení tepla existuje díky rozmanitým požadavkům na sušený materiál celá řada sušáren. Rozdělují se podle toho, jakým způsobem dodávají potřebnou energii k sušení. Nejčastěji materiál přijímá teplo z nosného média ve formě plynu, který proudí sušárnou a dostává se do styku se sušeným materiálem. Jedná se tedy o konvenční sušárnu. Typů konvektivních sušáren je mnoho. Obecně se dají sušárny dělit na základě mnoha kritérií, jejichž rozdělení a popisu se budu věnovat později.

## 2.2 Sušicí proces

Průběh sušicího procesu můžeme popsat pomocí sušicí křivky. Sušicí křivka je jednou ze základních charakteristik sušicího procesu a popisuje změnu vlhkosti sušeného materiálu v závislosti na čase sušení. Pomocí vzorků o známé hmotnosti měříme v určitých časových intervalech úbytek vlhkosti. Ze zjištěných hodnot sestrojíme závislost vlhkosti materiálu na čase  $W = f(\tau)$ . Kinetiku sušicího procesu lépe vystihuje diagram rychlosti sušení, ten vyjadřuje rychlost úbytku vlhkosti v materiálu v závislosti na čase. [23]



Obrázek 9 Sušicí křivka (závislost změny vlhkosti materiálu na čase), diagram rychlosti sušení, diagram teploty sušeného materiálu [24]

Podle sušicí křivky můžeme rozdělit sušicí proces na tři období. Z obrázku výše uvedeného plyne, že počáteční úsek sušení probíhá mezi body A a B, úsek stálé rychlosti sušení probíhá mezi body B a C a úsek klesající rychlosti sušení mezi body C a D.

### 2.2.1 Počáteční úsek sušení

Vlhký materiál se začne ohřívat z počáteční teploty  $t_p$  [°C] na teplotu vlhkého teploměru  $t_w$  [°C]. Dochází k postupnému odpařování vody, při kterém je spotřebováváno teplo ze sušicího média. Vlivem spotřebovávání tepla k odpařování vody se ohřev materiálu zpomaluje. Počáteční úsek je velmi krátký a v některých případech obtížně zachytitelný. [22]

### 2.2.2 Úsek stálé rychlosti sušení

Materiál dosáhne teploty vlhkého teploměru a dále teplota roste pouze nepatrně. Děje se tak, protože všechno dodávané teplo je spotřebováváno na odpařování vody z mezní vrstvy. Rychlost sušení je v této fázi konstantní a závisí na teplotě, hmotnostním průtoku a vlhkosti sušicího vzduchu. [22]

### 2.2.3 Úsek klesající rychlosti sušení

Tento úsek nastává, když kompletní povrch materiálu přestane pokrývat vrstva vody. Jedná se o první okamžik, kdy jsou částice materiálu v kontaktu se sušicím vzduchem. To má za následek ohřev materiálu na vyšší teplotu, než je teplota vlhkého teploměru. Rychlost ohřevu sušeného materiálu postupně zpomaluje až do okamžiku, kdy materiál dosáhne stejné teploty a vlhkosti, jako obklopující prostředí. V tomto okamžiku nastává stav rovnovážné vlhkosti a materiál nelze v daném prostředí více sušit. [22]

### 2.2.4 Podmínky sušicího procesu

Jedná se podmínky, které nám popisují sušicí proces, dělíme je na vnitřní a vnější.

Vnější podmínky: Jedná se o podmínky, za kterých se přivádí teplo potřebné k odstranění vlhkosti a odvádění vzniklé páry. Podmínky jsou definovány na základě termodynamických a aerodynamických poměrů v sušicím systému a lze je ovlivnit volbou technologie sušení a konstrukcí sušárny, podle které se nastavují parametry sušicího prostředí a sušeného výrobku. [24]

Vnitřní podmínky: Jsou to podmínky, které jsou charakterizovány vazbou vlhkosti ve hmotě a možností pohybu vlhkosti ve vysoušeném materiálu. Závisí zejména na charakteru vysušované látky a můžeme je ovlivnit pouze v omezené míře. Jedná se o podmínky v souvislosti se strukturou materiálu a jeho formě, fyzikální vlastnosti materiálu, fyzikální vlastnosti vlhkosti, druh vazeb mezi vlhkostí a hmotou, schopnost materiálu pojmout a vést vlhkost atd. [24]

## 2.3 Vlhký vzduch – základní výpočtové vztahy – definice veličin

Pro průběh sušicího procesu je základním faktorem kvalita sušicího vzduchu. V případě sušení v konvektivní sušárně je sušicím plynem směs dvou látek, suchého vzduchu a vodní páry. Aktuální stav jednotlivých látek v průběhu sušicího procesu lze popsat pomocí příslušných stavových veličin, jako jsou tlak, objem, teplota, molární hmotnost aj. Jelikož se jedná o směs dvou látek, jsou jejich teplota a objem totožné. Podíl zastoupení vodní páry, vztažený na celkovou hmotnost směsi, je zanedbatelný, z toho vyplývá, že celkový tlak směsi se výrazně neliší od tlaku suchého vzduchu tedy, atmosférického tlaku. Můžeme tak pokládat směs suchého vzduchu a vodní páry za ideální plyn. [25] [26]

### 2.3.1 Ideální plyn – stavová rovnice

Ideální plyn je definován jako dokonale stlačitelný plyn bez vnitřního pnutí. Za ideální plyn můžeme požadovat plyn, který splňuje následující kritéria:

- Rozměry molekul ideálního plynu jsou ve srovnání se svojí střední vzdáleností molekul od sebe zanedbatelně malé
- Molekuly ideálního plynu mimo vzájemné srážky na sebe vzájemně silově nepůsobí
- Vzájemné srážky molekul ideálního plynu jsou dokonale pružné

Chování ideálního plynu popisuje stavová rovnice.

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot t \quad 2.1$$

Kde  $p$  [MPa] je tlak plynu,  $V$  [m<sup>3</sup>] je objem plynu,  $n$  [mol] je látkové množství,  $R_m$  je molární plynová konstanta [8,314 J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] a  $t$  [°C] je teplota.

Pro naši aplikaci se lépe hodí rozšířené vyjádření stavové rovnice

$$n = \frac{m}{M_m} \quad 2.2$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M_m} \cdot R_m \cdot t \quad 2.3$$

Kde  $m$  [kg] je hmotnost plynu a  $M_m$  [kg · mol<sup>-1</sup>] je molární hmotnost. Odchytky parametrů vlhkého vzduchu jsou pro teploty mezi -70 °C a 200 °C a rozmezí tlaků 0,1 MPa až 1 MPa vzhledem ke stavové rovnici zanedbatelné a proto je možné stavovou rovnici využít i pro naši aplikaci. [25] [26]

### 2.3.2 Daltonův zákon parciálních tlaků

Daltonův zákon je pojmenovaný po svém objeviteli Johnu Daltonovi. Jeho definice zní takto: Tlak směsi plynů je roven součtu jejich parciálních tlaků.

$$\sum_{i=1}^n p_i = p \quad 2.4$$

Daltonův zákon nám říká, že pokud máme směs plynu v nějakém objemu, tak jednotlivé složky se chovají, jako by tam byly samy a platí pro každou z nich vlastní stavová rovnice

o určitém parciálním tlaku a hmotnosti. Ze stavové rovnice (2.1) vyplývá, že hodnota parciálního tlaku svým způsobem popisuje množství dané látky ve směsi.

### 2.3.3 Teplota vlhkého teploměru

Je to teplota  $t_w$  [°C], kterou ukazuje teploměr, jehož teploměrná nádoba je obalena tkaninou napuštěnou destilovanou vodou. Tímto způsobem měříme teplotu vzduchu při jeho 100 % vlhkosti, v průběhu odpařování vody do okolního prostředí. Při relativní vlhkosti menší než 100 % se mokré předměty ochlazují odpařováním vody, proto je jejich teplota nižší, než teplota vzduchu. Teplota  $t_w$  leží mezi teplotou vzduchu a teplotou rosného bodu. V h-x diagramu můžeme nalézt teplotu vlhkého teploměru pro daný stav vzduchu na průsečíku křivky nasycení a křivky konstantní měrné entalpie.

### 2.3.4 Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu  $t_r$  [°C] je teplota, při které je vzduch nasycen vodní párou. Jestliže dojde k dalšímu ochlazení vzduchu, nastane kondenzace. V h-x diagramu nalezneme rosný bod pro daný stav vzduchu na průsečíku křivky nasycení a měrné vlhkosti.

### 2.3.5 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost je definovaná jako parciální tlak vodních par ve směsi o určité teplotě vůči parciálnímu tlaku sytých par o stejné teplotě a značí se  $\varphi$  [-]. Jak víme z kapitoly 2.3.2., parciální tlak je přímo úměrně svázaný s množstvím látky ve směsi. Díky tomuto poznání můžeme říct, že relativní vlhkost popisuje, nakolik je kapacita vzduchu pro páry využita.

$$\varphi = \frac{p_p}{p_p''} \quad 2.6$$

### 2.3.6 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost vyjadřuje hmotnostní poměr vodní páry a suchého vzduchu a značí se  $x$  [ $g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ].

$$x = \frac{m_p}{m_{s.v.}} \quad 2.7$$

Kde  $m_p$  [g] je hmotnost vodní páry a  $m_{s.v.}$  [ $kg_{s.v.}$ ] je hmotnost suchého vzduchu. Pro naši aplikaci je dobré znát vztah, díky kterému můžeme přepočítat relativní vlhkost na měrnou vlhkost.

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p - \varphi \cdot p_p''} \quad 2.8$$

Kde  $p$  [Pa] je tlak celé směsi, pro naši aplikaci se jedná o tlak atmosférický.

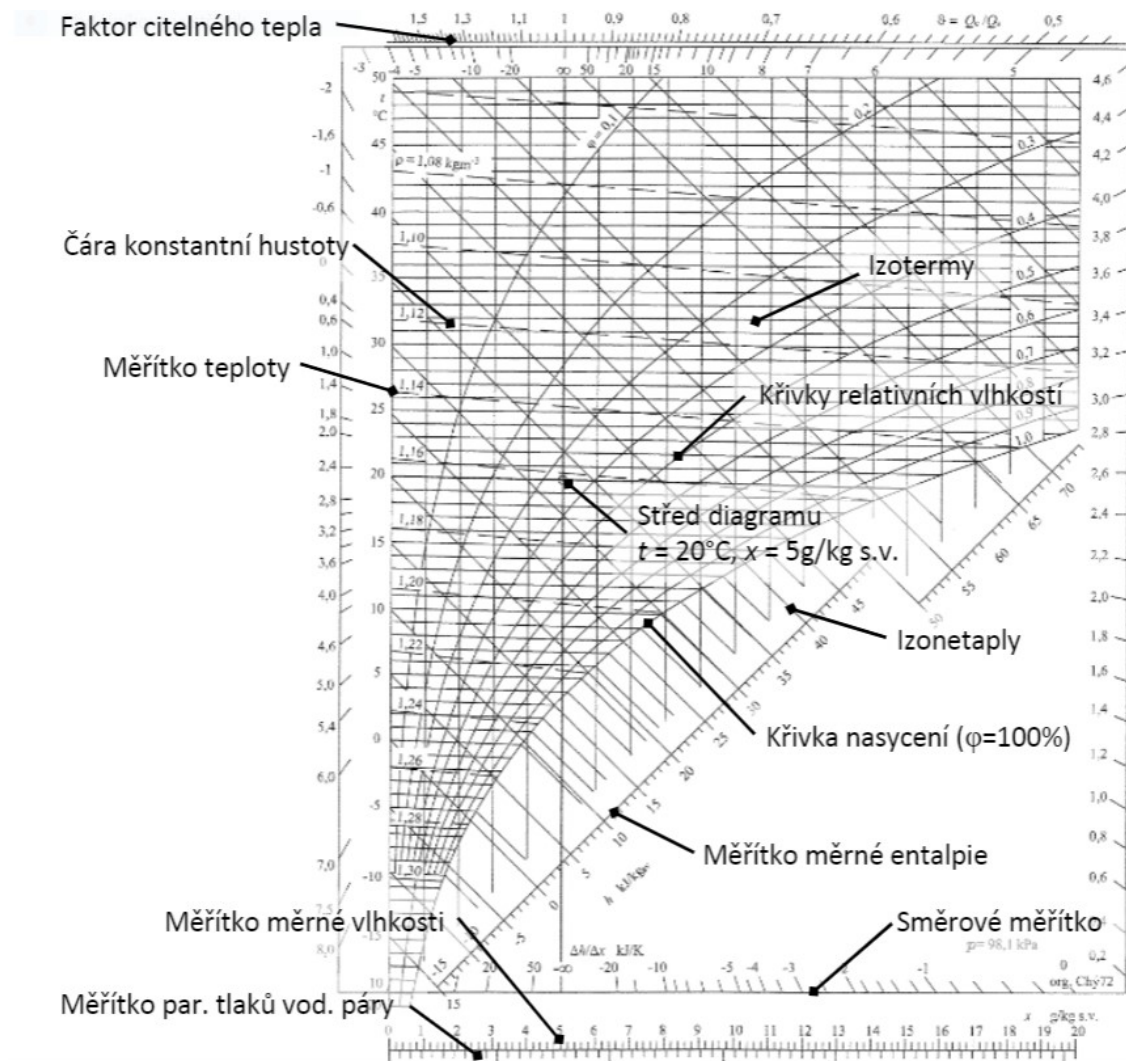
## 2.4 Mollierův h - x diagram

Mollierův diagram je pojmenovaný po jeho tvůrci Richardu Mollierovi. Jedná se o stavový diagram, který je využíván jako grafický nástroj pro určení izobarických změn stavů vlhkého vzduchu. Diagram je konstruován pro jeden určitý tlak, protože chování a vlastnosti vlhkého vzduchu závisí na barometrickém tlaku.

Křivka nasycení vlhkého vzduchu  $\varphi = 100 \%$  dělí diagram na dvě oblasti. Nad křivkou sytosti se nachází oblast stavů nenasyčeného vlhkého vzduchu, v které jsou vyznačeny křivky konstantní relativní vlhkosti od  $\varphi = 0$  až po  $\varphi = 100 \%$ . Pod křivkou nasycení se nachází oblast přesyceného vlhkého vzduchu.

Na vodorovné ose se nachází stupnice měrné vlhkosti  $x$  [ $g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ]. Na svislé ose se nachází stupnice teploty  $t$  [ $^{\circ}C$ ], kterou představují jednotlivé izotermy, které nejsou rovnoběžné, mírně se rozbíhají, jejich sklon se ze zvyšující teplotou zvětšuje směrem nahoru a po protnutí křivky sytosti se lomí. Na průsečíku křivky sytosti a měrné vlhkosti leží teplota rosného bodu  $t_r$  [ $^{\circ}C$ ]. Izoentalpy jsou orientovány pod úhlem  $135^{\circ}$  a to z důvodu kvantitativního zobrazení diagramu. Teplotu vlhkého teploměru  $t_w$  [ $^{\circ}C$ ] zjistíme tak, že z daného stavu vedeme čáru po přímce izotermy vlhkého teploměru až na křivku nasycení. Izoterma na průsečíku udává teplotu vlhkého teploměru. [25] [27]





Obrázek 10 Mollierův graf [28]

## 2.5 Základní procesy změn stavů vzduchu

Pro získání ucelené představy v kontextu naší aplikace, je nezbytné chápat, jak probíhají jednotlivé děje, jak je graficky znázornit v Mollierově diagramu a jak je energeticky popsat. V následujících podkapitolách se touto problematikou budeme podrobněji zabývat a jednotlivé děje si zobrazíme na zjednodušeném  $h - x$  diagramu.

### 2.5.1 Ohřev vzduchu

Jedná se o cílený proces zvýšení teploty vzduchu, který je možný realizovat pouze sdílením tepla do jeho proudu. Proces probíhá na teplosměnné ploše ohřivačů. Děj je realizován bez změny měrné vlhkosti  $\Delta x = 0 [\text{g} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}]$  a proto je v  $h - x$  digramu znázorněn po svislé linii měrné vlhkosti. Dále je patrné, že relativní vlhkost  $\varphi [-]$  klesá,

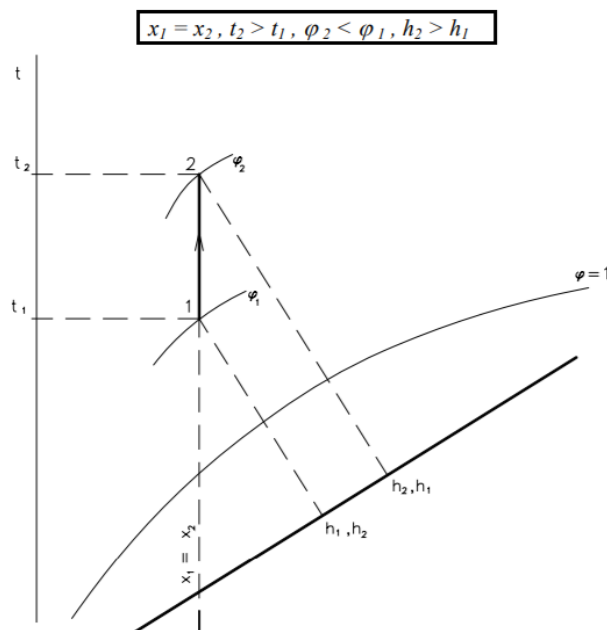
protože vzrůstá potenciál vzduchu nabírat vlhkost. Energie, kterou je nutné při ohřevu dodat, se rovná rozdílu měrných entalpií  $\Delta h$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}$ ]. [27]

Výkon ohřevu  $\dot{Q}_{oh}$  [W], který se musí do systému přidat, vypočítáme dle níže uvedeného vzorce:

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad 2.9$$

$$\dot{Q}_{oh} = \dot{m}_{ov} \cdot \Delta h \quad 2.10$$

Kde  $\dot{m}_{ov}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je hmotnostní průtok ohřívaného vzduchu.



Obrázek 11 Ohřev vzduchu [27]

### 2.5.2 Chlazení vzduchu

Chlazení je cílený proces snižování teploty proudu vzduchu. Děj probíhá přímým kontaktem chlazeného vzduchu s teplosměnnou plochou chladiče a proto je nutné, konstruovat chladič s co největší hustotou chladících lamel a s co nejmenšími mezerami mezi jednotlivými lamelami. Chlazení dělíme na dva typy:

Chlazení bez kondenzace vodní páry: Jinak ho nazýváme suchým chlazením. Děj probíhá, pokud je povrchová teplota chladiče vyšší než teplota rosného bodu ochlazovaného vzduchu  $t_{ch} > t_r$ . Jelikož nedochází k vylučování vody do vzduchu, děj probíhá v h-x diagramu na linii rovnoběžné s přímkami měrné vlhkosti směrem dolů. Při chlazení je nutné odebrat teplo, které se rovná rozdílu hodnot měrných entalpií  $\Delta h$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}$ ]. [27]

Výkon chlazení  $\dot{Q}_{ch}$  [W], který se musí ze systému odebrat teplo, vypočítáme dle níže uvedeného vzorce:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad 2.11$$

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{chv} \cdot \Delta h \quad 2.12$$

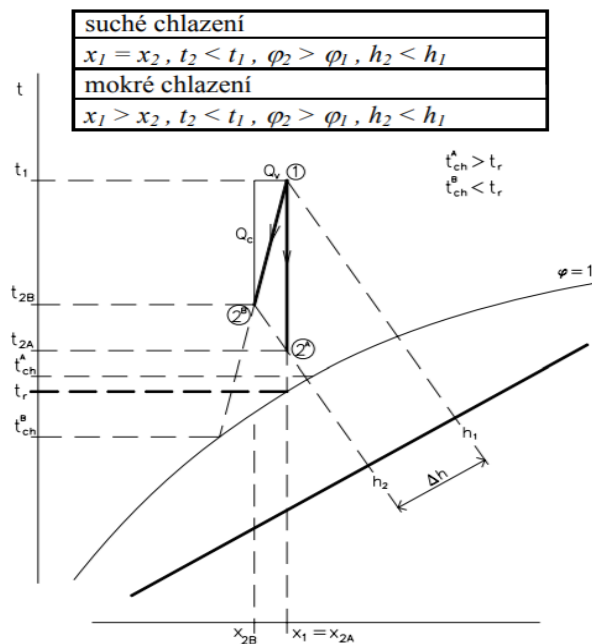
Kde  $\dot{m}_{chv}$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ] je hmotnostní průtok ochlazovaného vzduchu.

Chlazení s kondenzací vodní páry: Jinak ho nazýváme mokrým chlazením. Děj probíhá, pokud je povrchová teplota chladiče nižší než teplota rosného bodu ochlazovaného vzduchu  $t_{ch} < t_r$ . V průběhu děje tak dochází ke snižování obsahu vodních par ve vzduchu v důsledku kondenzace. V h-x digramu probíhá děj po úsečce spojující počáteční stav vzduchu a průsečík střední teploty povrchu chladiče s křivkou sytosti. Jelikož se nikdy neochlazuje celý objem vzduchu, dochází při ději k tzv. obtokovému efektu, tudíž konečný stav vzduchu leží někde na výše zmíněné úsečce. [27]

Množství zkondenzované vody  $\dot{m}_w$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ] je dáno rozdílem měrných vlhkostí počátečního a koncového stavu  $\Delta x$  [ $g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ].

$$\Delta x = x_1 - x_2 \quad 2.13$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{chv} \cdot \Delta x \quad 2.14$$

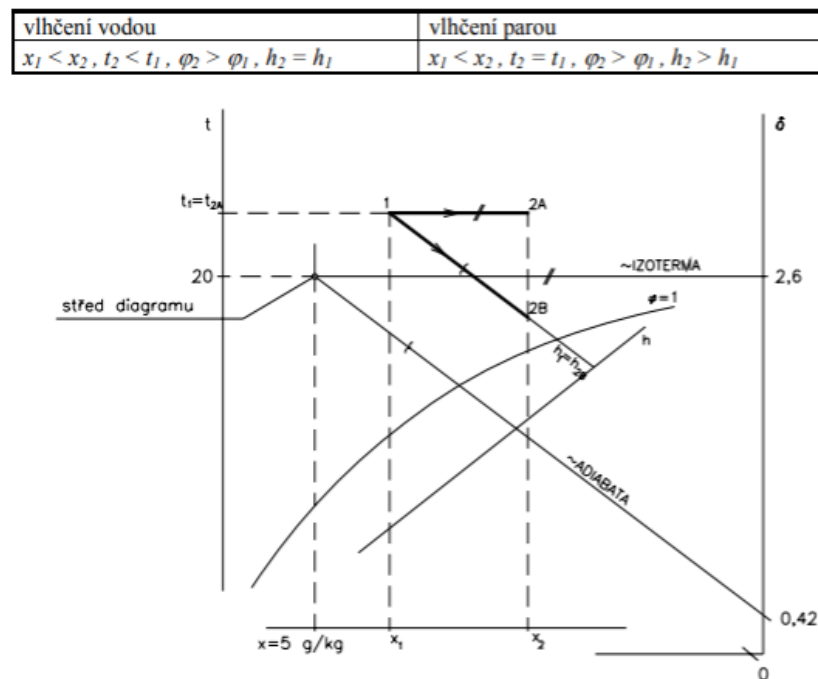


Obrázek 12 Procesy chlazení vzduchu [26]

Na obrázku 13 jsou zobrazeny děje chlazení s kondenzací a bez kondenzace pro stejný výkon chladiče. Je patrné, že při chlazení s kondenzací je část výkonu spotřebována na změnu skupenství vodní páry a tudíž má koncový stav vyšší teplotu než koncový stav při chlazení bez kondenzace.

### 2.5.3 Vlhčení vzduchu

Jedná se o děj, při kterém se zvyšuje obsah vodní páry ve vzduchu. Vlhčení vzduchu se charakterizuje výhradně změnou měrné vlhkosti, nikoliv relativní vlhkosti. Proces se dá realizovat dvěma způsoby. Vlhčení vodou se realizuje rozprašováním vody do proudu vzduchu a na  $h - x$  diagramu se děj zobrazuje po čáře konstantní entalpie, jedná se tedy o proces adiabatický. Vlhčení parou se realizuje vstříkáváním páry do proudu vzduchu a na  $h - x$  diagramu se děj zobrazuje po čáře konstantní teploty, jedná se tedy o děj izotermický.



Obrázek 13 Procesy vlhčení vzduchu [27]

Množství vody, které musí vzduch absorbovat, aby se počáteční měrná vlhkost změnila na cílovou hodnotu, je definován rovnicí (2.14), tedy stejnou rovnicí, která definuje množství z kondenzované vodní páry při chladícím procesu.

## 2.6 Přenos vlhkosti konvekcí

Vedle difuzního mechanismu se při přenosu vlhkosti z adsorbentu do sušícího vzduchu uplatňuje mechanismus konvektivní difuze. Přenos vlhkosti je závislý na přenosu tepla, který se počítá pomocí součinitelů přestupu tepla. Hustota tepelného toku  $q$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] pro konvektivní přesun tepla se počítá pomocí vztahu [24]:

$$q = \alpha_k \cdot (t_A - t_{Aw}) \quad 2.15$$

Kde  $\alpha_k$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] je koeficient přestupu tepla, který závisí především na rychlosti proudění vzduchu,  $t_{Aw}$  [ $^{\circ}C$ ] je teplota na fázovém rozhraní mezi mezní vrstvou a okolím a  $t_A$  [ $^{\circ}C$ ] je teplota vzduchu. [24]

Stejně jako hustotu tepelného toku počítáme hustotu toku vlhkosti (hmoty)  $\Phi$  [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] dle rovnice:

$$\Phi = k_x \cdot (x_{Aw} - x_A) = k_p \cdot (p''_{Aw} - p_A) = k_U \cdot (U_{Aw} - U_A) = \frac{dm_A}{dA}, \quad 2.16$$

Kde  $k_x$  [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] je koeficient přestupu vlhkosti (hmoty), vztahující se k rozdílu specifických vlhkostí vzduchu na rozhraní mezní vrstvy a okolí  $x_{Aw}$  [ $g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ] a specifické vlhkosti sušícího vzduchu  $x_A$  [ $g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ];  $k_p$  [ $s \cdot m^{-1}$ ] je součinitel přenosu vlhkosti, vztahující se k rozdílům parciálního tlaku sytých par na fázovém rozhraní  $p''_{Aw}$  [ $MPa$ ] a par v okolním prostředí  $p_A$  [ $MPa$ ]; součinitel přenosu vlhkosti  $k_U$  [ $kg \cdot m^{-2}$ ], vztahující se k diferenci relativních hmotnostních zlomků vlhkosti ve vzduchu v obklopujícím prostředí  $U_A$  [-] a vzduchu na fázovém rozhraní  $U_{Aw}$  [-]. Množství vlhkosti  $dm_A$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ] odpařené plochou fázového rozhraní  $dA$  [ $m^2$ ]. [24]

### 2.6.1 Koeficient přestupu tepla a hmoty při nucené konvekcí

Jelikož při naší aplikaci budeme využívat sušičku, u které cirkulaci sušícího vzduchu generuje ventilátor, popíšeme si určování koeficientu přestupu tepla a hmoty při nucené konvekcí. V následujících podkapitolách zjistíme, že kritériální rovnice pro stanovení přestupu tepla analogicky odpovídají rovnicím pro získání koeficientu přestupu hmoty.

#### Konvektivní přenos tepla:

Při popisu přenosu tepla vycházíme z rovnic vedení tepla u stěny, rovnice kontinuity, pohybové rovnice a rovnice energie. Po řešení diferenciálních rovnic dospějeme ke kritériálnímu podobnostem, které popisují přenos tepla konvekcí. [29]

V případě přenosu tepla je stěžejním parametrem Nusseltovo kritérium  $Nu$  [–], které je funkcí kritérií  $Re$  a  $Pr$ . Nusseltovo číslo charakterizuje závislost mezi intenzitou přestupu tepla a teplotním polem v mezní vrstvě proudu tekutiny a vyplývá z rovnice přestupu tepla. [29]

Nusseltovo číslo:

Pro laminární obtékání desky dle Pohlhausena získáme koeficient přestupu tepla z rovnice:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad 2.17$$

Podmínka pro laminární proudění je:  $Re < 10^4$ ;  $0,1 < Pr < 1000$

Pro turbulentní obtékání desky dle Kutateladze má rovnice tvar:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda} = 0,664 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad 2.18$$

Podmínka pro turbulentní proudění je:  $Re > 10^4$ ;  $Pr \geq 0,5$

Kde  $l$  [m] je charakteristický délkový rozměr,  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] je součinitel tepelné vodivosti v našem případě vzduchu,  $Re$  [–] je Reynoldsovo číslo a  $Pr$  [–] je Prandtlovo číslo.

Reynoldsovo číslo:

Reynoldsovo číslo vychází z pohybové rovnice a získáme ho použitím vztahu:

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \quad 2.19$$

Kde  $u$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je rychlost proudícího vzduchu a  $\nu$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] je kinematická viskozita vzduchu.

Reynoldsovo číslo popisuje režim proudění. Při nuceném obtékání desky je  $Re_{krit} = 10^5$ . Jestliže hodnota  $Re$  přesáhne  $Re_{krit}$ , jedná se o proudění turbulentní. Jestliže je hodnota  $Re$  nižší než hodnota  $Re_{krit}$  jedná se o proudění laminární.

Prandtlovo číslo:

Prandtlovo kritérium charakterizuje fyzikální vlastnosti tekutiny. Pro plyny je Prandtlovo číslo blízké hodnotě jedna a je definováno rovnicí:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad 2.20$$

Kde  $Pe$  [–] je Pecletovo číslo, které vyplývá z rovnice energie,  $a$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] je součinitel teplotní vodivosti vzduchu,  $\eta$  [ $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ] je dynamická viskozita a  $c_p$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita. [29]

#### Konvektivní přenos hmoty:

Koeficient přestupu hmoty  $k_x$  zjišťujeme analogicky jako u případu přenosu tepla. Stěžejním parametrem Sherwoodovo kritérium  $Sh$  [–], které je funkcí kritérií  $Re$  a  $Sc$ . [29]

#### Sherwoodovo číslo:

Pro laminární obtékání desky má rovnice tvar:

$$Sh = \frac{k_x \cdot l}{D_{AB}} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad 2.21$$

Pro turbulentní obtékání desky má rovnice tvar:

$$Sh = \frac{k_x \cdot l}{D_{AB}} = 0,664 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{1/3} \quad 2.22$$

Kde  $D_{AB}$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] je koeficient molekulární difuze složky A do složky B a  $Sc$  [–] je Schmidtovo číslo vyjádřeno následující rovnicí:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad 2.23$$

#### Konvektivní přenos tepla a hmoty simultánně:

Během sušicího procesu při nucené konvekci probíhá proces přenosu tepla a hmoty společně a navzájem se ovlivňují, jak jsme si již popsali v předchozích kapitolách. Jejich vztah je popsán pomocí Lewisova čísla, které získáme podílem kritériálních rovnic dle vztahu [30]:

$$\frac{Sh}{Nu} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^n = Le^n \quad 2.24$$

Kde  $Le$  [–] je Lewisovo číslo a  $n$  je exponent Schmidtova a Prandtlova čísla u kritériálních rovnic  $Nu$  a  $Sh$ .

#### Lewisovo číslo:

$$Le = \frac{a}{D_{AB}} \quad 2.25$$

Při využití Nusseltova, Sherwoodova a Lewisova kritéria získáme po úpravě vzorec, který vyjadřuje vztah mezi koeficienty přenosu tepla a hmoty:

$$\frac{\alpha_k}{k_U} = c_{pv.v.} \quad 2.26$$

Kde  $c_{pv.v.} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu vztáhnutá na kg suchého vzduchu, kterou vypočítáme ze vztahu:

$$c_{pv.v.} = U_A \cdot c_{pv} + c_{ps.v.} \quad 2.27$$

Kde  $c_{pv} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita vody a  $c_{ps.v.} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu.

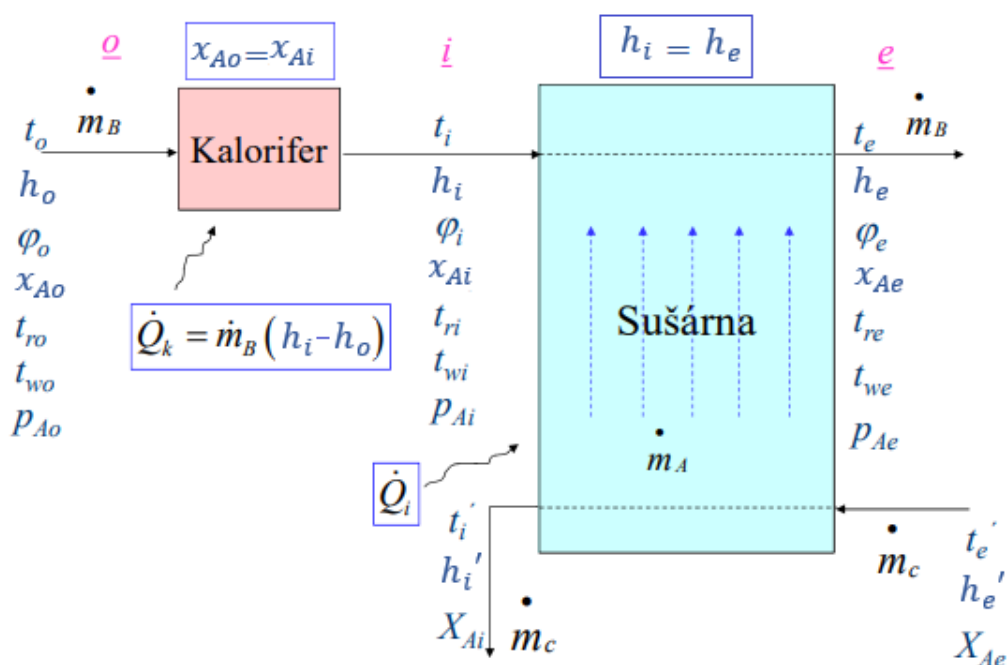


### 3 BILANCE SUŠÁRNY

Bilance je obecné označení pro rozbor a výpočet všech jevů, které probíhají uvnitř vymezeného systému. Systémem myslíme vnitřní prostor sušárny, potažmo celý technologický celek, který zahrnuje další navazující zařízení. [24]

Pro účely práce budeme uvažovat kontinuálně pracující sušárnu. Vycházíme ze schématu znázorněného na obrázku č. 15. Sušárna pracuje ustáleně a vzduch je před vstupem do sušicí komory ohříván pomocí kaloriferu. [24]

Je nutné dodat, že v kontinuální sušárně jsou entalpie a koncentrace vlhkosti plynu, potažmo materiálu, funkcí místa, nikoliv funkcí času. [24]



Obrázek 14 Schéma kontinuální ideální sušárny [24]

#### 3.1 Materiálová bilance

Materiálovou bilanci kontinuální sušárny zobrazené na obrázku 14 lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$\dot{m}_c \cdot (X_{Ae} - X_{Ai}) = \dot{m}_B (x_{Ae} - x_{Ai}) = \dot{m}_A \quad 3.1$$

Kde  $\dot{m}_c$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ] Je hmotnostní tok sušeného materiálu,  $X_{Ai}$  [ $kg$ ] je relativní zlomek vlhkosti materiálu na výstupu ze sušárny a reprezentuje podíl hmotnosti vlhkosti k hmotnosti suchého materiálu,  $X_{Ae}$  [ $kg$ ] je relativní zlomek vlhkosti materiálu na vstupu do sušárny a reprezentuje podíl hmotnosti vlhkosti k hmotnosti suchého materiálu.  $\dot{m}_B$  [ $kg \cdot$

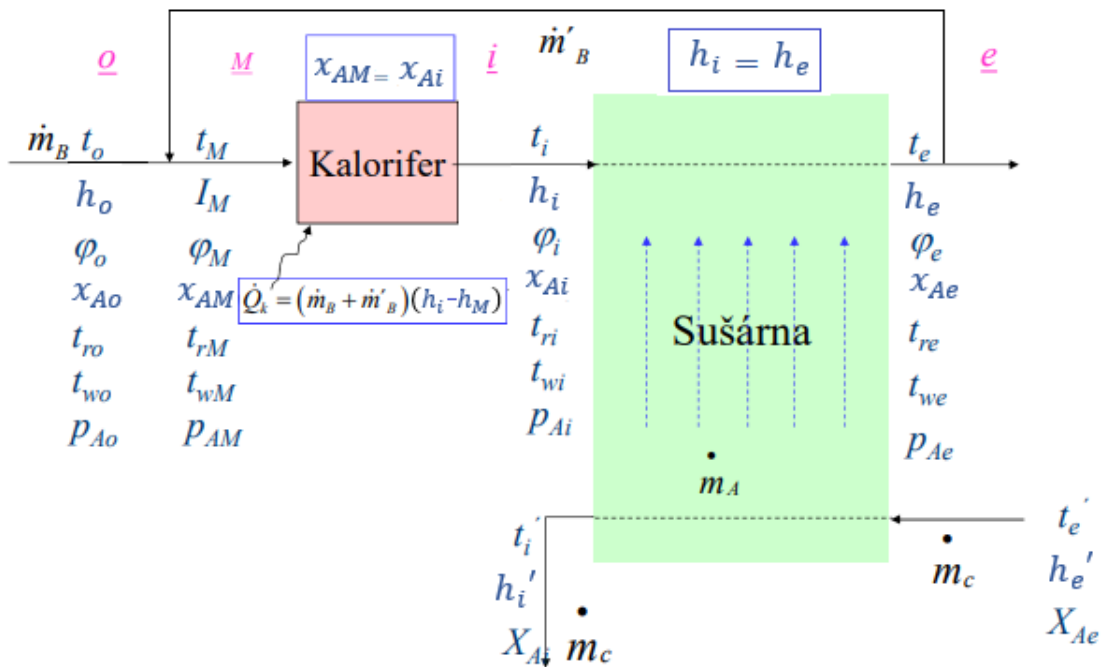
$s^{-1}$ ] je hmotnostní tok sušícího vzduchu,  $x_{Ae}$  [kg] je relativní zlomek vlhkosti vzduchu na výstupu k hmotnosti suchého vzduchu,  $x_{Ai}$  [kg] je relativní zlomek vlhkosti vzduchu na vstupu k hmotnosti suchého vzduchu a  $\dot{m}_A$  [kg · s<sup>-1</sup>] je hmotnostní tok vlhkosti. [24]

Pokud bychom uvažovali kontinuální sušárnu s recyklem, tedy sušárnu, kde určitý poměr sušícího vzduchu cirkuluje, potom vypočítáme materiálovou bilanci dle vztahu:

$$\dot{m}_c \cdot (X_{Ae} - X_{Ai}) = (\dot{m}_B + \dot{m}'_B) \cdot (x_{Ae} - x_{Ai}) = \dot{m}_A \quad 3.2$$

Kde  $\dot{m}'_B$  [kg · s<sup>-1</sup>] je hmotnostní tok recyklovaného vzduchu vráceného do oběhu.

Schéma kontinuální sušárny s recyklem je na obrázku č. 15.



Obrázek 15 Schéma kontinuální ideální sušárny s recyklem [24]

### 3.2 Entalpická bilance

Sušící vzduch je nejdříve ohříván v kaloriferu u kontinuální sušárny dle rovnice:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_B \cdot (h_i - h_o) \quad 3.3$$

Kde  $\dot{Q}_k$  [W] je tepelný příkon kaloriferu,  $h_i$  [kJ · kg<sub>s.v.</sub><sup>-1</sup>] je relativní měrná entalpie vzduchu ohřátého kaloriferem a  $h_o$  [kJ · kg<sub>s.v.</sub><sup>-1</sup>] je relativní měrná entalpie sušícího vzduchu před ohřevem.

U kontinuální sušárny s recyklem platí vztah pro ohřev vzduchu v kaloriferu dle rovnice:

$$\dot{Q}_k = (\dot{m}_B + \dot{m}'_B) \cdot (h_i - h_m) \quad 3.4$$

Kde  $h_m [kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$  je relativní měrná tepelná entalpie recyklovaného vzduchu vráceného do oběhu a platí pro ni vzorec:

$$h_m = \frac{h_o + R \cdot h_e}{1 + R} \quad 3.5$$

Kde  $R [-]$  je poměr množství recyklovaného vzduchu k množství čerstvého vzduchu.

Pro stanovení samostatné entalpické bilance kontinuálně pracující sušárny platí vztah:

$$\dot{Q} = \dot{m}_B \cdot (h_e - h_i) + \dot{m}_C \cdot (h'_i - h'_e) + \dot{Q}_0 - \dot{Q}_z \quad 3.6$$

Kde  $h'_e [kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$  je relativní měrná entalpie sušeného materiálu na vstupu do sušárny,  $h'_i [kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$  je relativní měrná entalpie sušeného materiálu na výstupu ze sušárny. Při výpočtu ideální kontinuální sušárny se  $h_e = h_i$ .  $\dot{Q}_0 [W]$  je případný dodatečný tepelný příkon do sušárny a  $\dot{Q}_z [W]$  jsou tepelné ztráty způsobené nedokonalou tepelnou izolací, nedokonalým ohřevem materiálu a podobně. [24]

U kontinuální sušárny s recyklem je entalpická bilance vyjádřena vztahem:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_B + \dot{m}'_B) \cdot (h_e - h) + \dot{m}_C \cdot (h'_i - h'_e) + \dot{Q}_0 - \dot{Q}_z \quad 3.7$$

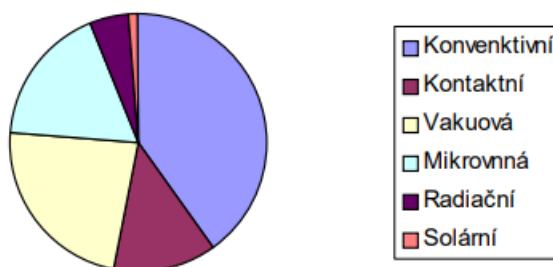
Opět platí pro ideální kontinuální sušárnu z recyklem  $h_e = h_i$ .

## 4 PŘEHLED SUŠÁREN

Jak bylo již zmíněno v předchozích kapitolách, sušení se provádí v sušárnách, kde se odstraňuje kapalina, nejčastěji voda, která je částečně na povrchu a částečně vně sušeného materiálu. Vzhledem k rozmanitým požadavkům na sušený materiál a obecně vzhledem k rozmanitým typům materiálu existuje mnoho konstrukčních typů sušáren, které se dají rozdělovat na základě mnoha kritérií. [24]

Základní rozdělení sušáren je podle způsobu, jakým je dodávána energie potřebná k sušení. Nejčastěji je energie do sušeného materiálu dodávána horkým plynem, který proudí sušárnou a dostává se tak do kontaktu se sušeným materiálem. Zařízení, které takto pracuje, se nazývá konvektivní sušárna. V jiných případech se energie materiálu dodává zvenčí jako například v sušárnách kontaktních, radiálních, mikrovlnných atd. Z těchto typů sušáren následně odchází pouze pára vlhkosti a v některých případech spolu s ní i inertní plyn.

**Podíl zastoupení sušáren v průmyslové výrobě dle předávání energie**



*Obrázek 16 Podíl zastoupení sušáren v průmyslové výrobě dle předávání energie [24]*

Dále můžeme sušárny rozdělovat na základě níže uvedených hledisek [24]:

- Dle tlaku sušicího prostředí: atmosférický, podtlakový, přetlakový.
- Dle výrobního cyklu: periodická, kontinuální.
- Dle druhu sušicího prostředí: vzduch, přehřátá pára, spaliny.
- Dle způsobu pohybu materiálu: materiál je stacionární, zdrojem pohybu je potenciální energie sušeného materiálu, zdrojem pohybu je kinetická energie sušicího média či sušeného materiálu.
- Dle proudění sušicího média: ofukování, fluidizace, profukování, proudění.

Na základě značného potenciálu této kapitoly, jsou uvedeny jen vybrané typy konvektivních sušáren pro pevné a sypké materiály.

## **4.1 Konvektivní sušárny**

Jedná se o sušárny, které předávají energii potřebnou k sušení horkým plynem, který se dostává do styku se sušeným materiálem.

Rozdělují se dle tlaku pracovního prostředí na vakuové, přetlakové a pracující při atmosférickém tlaku.

Dále jsou děleny na základě pracovního cyklu výroby na dávkové a kontinuální. Dávkové sušárny pracují tak, že sušící médium protéká kontinuálně, ale vsadka se vkládá periodicky, což znamená, že po určité době sušení je usušená vsázka vyměněna za novou. U kontinuálně pracujících sušáren je vsázka dodávána kontinuálně

Další rozdělení, které je stěžejní v souvislosti s konstrukcí dané sušárny, je dělení na základě charakteru sušeného materiálu. Jedná se o skupinu sušáren navržených k sušení pevných součástí a skupinu sušáren pro sušení sypkých materiálů, které lze promíchávat. Jedná se o prášky, granuláty, písky, suspenze a další. [31] [32] [33]

### Konvektivní sušárny pro pevné součásti:

- Komorová
- Tunelová
- Kondenzační
- Páternosterová

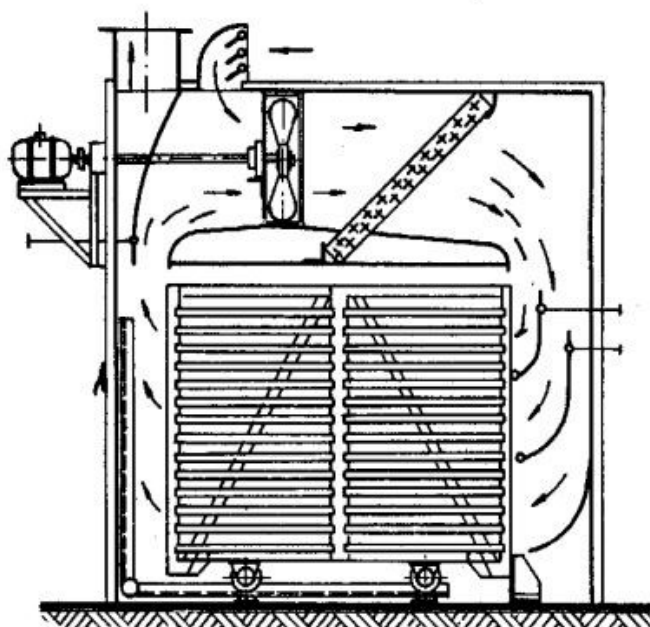
### Konvektivní sušárny pro sypké materiály:

- Bubnová
- Proudová
- Fluidní
- Rozprašovací

#### **4.1.1 Komorová sušárna**

Konstrukce je tvořena komorou, na jejíchž vnitřních stěnách je umístěna izolace. V komoře jsou umístěny přepážky, které usměrňují proudění vzduchu. Přepážky často obsahují

segment osazený žaluziemi, které je možné nastavovat a usměrňovat tak proudění vzduchu podle charakteru vsázky. Pracovní prostor sloužící k uložení vsázky je vymezen usměrňovacími přepážkami. Dle charakteru vsázky je pracovní prostor vybaven regálem, či jiným druhem zakladače pro uložení sušeného materiálu. Komora může obsahovat svařenou policovou konstrukci pro sortování paletových nosičů. Rozvod vzduchu je generován ventilátorem. Ohřev vzduchu je generován pomocí topných spirál, nebo spalováním zemního plynu hořákem. Ventilátor spolu s ohřivačem jsou umístěny mezi přepážkou a vyzdívkou. Na vstupu vzduchového oběhu sušárny je zaústěna sací klapka, kterou je možno ručně nebo automaticky řídit a v některých případech je možné implementovat přídatný ventilátor k nucenému nasávání vzduchu. Na výstupu vzduchového oběhu se nachází obdobná klapka, která slouží k odvodu vlhkého vzduchu, její konstrukce je obdobná jako u klapky sací. Za pomoci regulace dvojice klapek, lze částečně řídit sušicí proces. Konstrukci lze s přihlédnutím na vnější zástavbové prostory a na vnitřní užité rozměry snadno modifikovat a přizpůsobit vzhledem k povaze sušeného materiálu. V sušárně je možné sušit mnoho druhů rozmanitého materiálu. Tento koncept se používá pro menší výkony, kde by kontinuálně pracující sušárna nebyla ekonomická. [31] [32] [33]



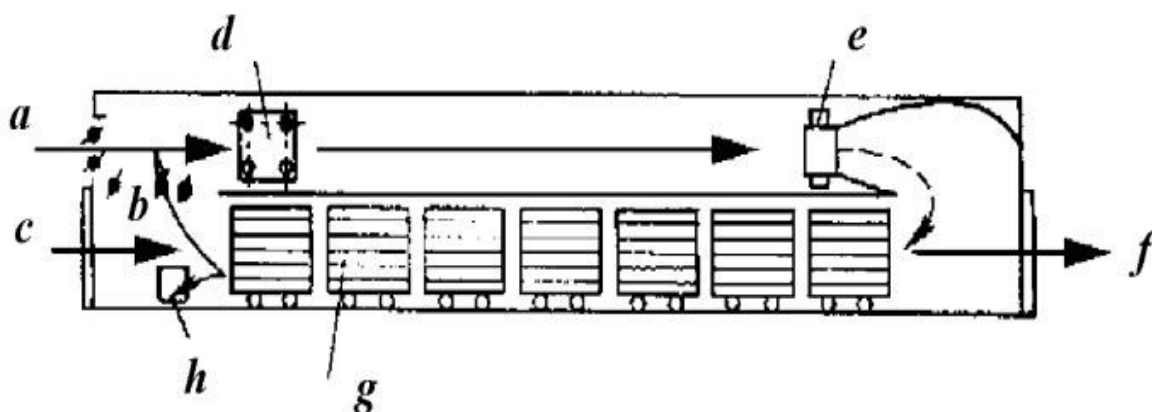
Obrázek 17 Schéma komorové sušárny [24]

Do sušárny je vložena vsádka v podobě vlhkého materiálu. Sušicí komora se uzavře vraty, které jsou obvykle ovládány pneumaticky nebo mechanicky. Ventilace začne nasávat vzduch z oblasti výrobní haly a vhání ho přes topná tělesa, potažmo šamotový spalinový

kanál při použití plynového hořáku do sušicí komory. Směr proudění sušicího vzduchu je nastaven žaluziemi umístěnými v usměrňující přepážce. Vzduch v sušicí komoře cirkuluje a přebírá vlhkost ze sušeného materiálu. Ovlhčený vzduch je následně samovolně odveden, nebo je nuceně odsáván přídatným ventilátorem. Podíl odváděného ovlhčeného vzduchu a přítah čerstvého vzduchu je regulován klapkami. Pracovní režim sušárny je periodický, takže je po vysušení nutné vysušený materiál ze sušárny vyjmout a vložit čerstvý vlhký materiál. Využití komorových sušáren je široké, používají se zejména při sušení materiálu, kde převládá vnitřní difuzní odpor. [31]

#### 4.1.2 Tunelová sušárna

Konstrukce je velmi podobná jako u komorové sušárny, avšak s drobnými odlišnostmi. Sušicí komora je uzpůsobena pro zavážecí vozík, nebo pro větší počet vozíků. Vozík se zpravidla pohybuje po kolejkách, které jsou součástí podlahy. Z důvodů bezpečnosti je minimální délka kolejí pro vyjetí rovna dvojnásobku hloubky sušárny. Vozík pohybující se po kolejkách je obvykle poháněn motoricky, ale může být i manuální pro méně rozměrné vsádky. Obvykle jsou tyto sušárny konstruovány jako průchozí, na každé straně sušárny jsou umístěna vrata, která se zpravidla otevírají hydraulicky. Větší tunelové sušárny mohou obsahovat více zón s vlastními topnými jednotkami. [31] [32]



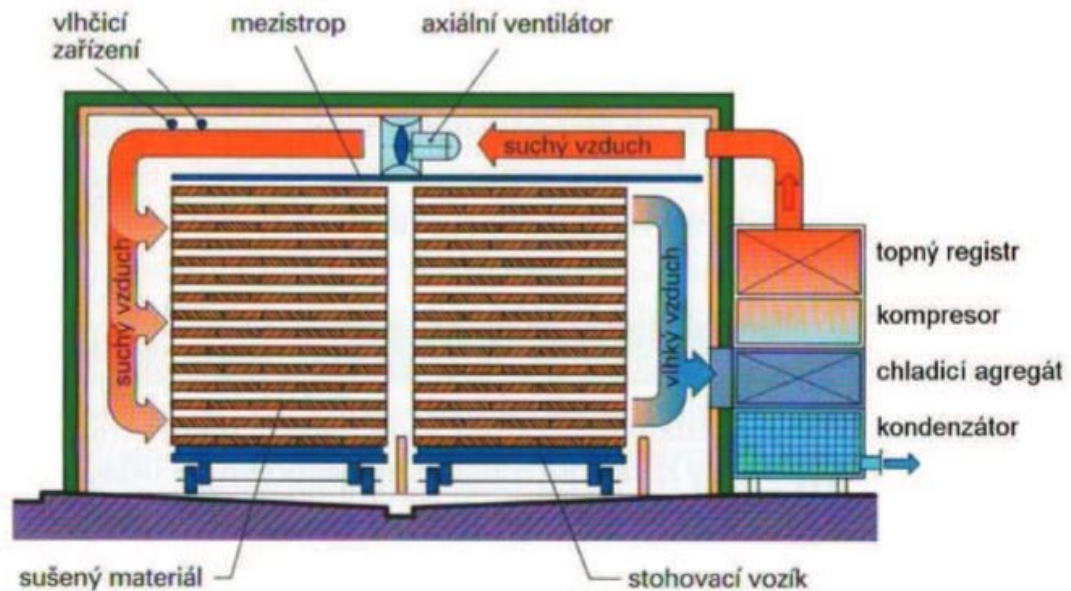
Obrázek 18 Schéma tunelové sušárny [24]

Provoz sušárny je totožný jako u komorové sušárny. Tunelová sušárna pracuje periodicky. Sušený materiál vstupuje v místě c na dopravných vozících g, které se postupně posouvají do místa f. Čerstvý vzduch vstupuje v místě a a ohřívá se v kaloriferu d. Následně je ohřátý vzduch nasáván ventilátorem e. Po změně směru proudění prochází protiproudě mezi vozíky, kde cirkuluje a odebírá tak vlhkost ze sušeného materiálu. V místě h odchází ovlhčený vzduch ze sušárny. V místě b se nachází klapky, kterými je možné nastavit určitý

poměr recyklujícího vzduchu. Pokud má tunelová sušárna více zón, může vsádka po vysušení přejít do zóny, kde dochází například k chladicímu procesu. Podmínkou je, že komory musí být od sebe tepelně izolovány. [24]

#### 4.1.3 Kondenzační sušárna

Konstrukce je podobná jako u komorové sušárny s rozdílem, že cirkulační okruh je uzavřený a obsahuje navíc kondenzační odvlhčovací jednotku. Odvlhčovací jednotka pracuje na principu tepelného čerpadla. S ohledem na druh použité chladicí kapaliny tepelného čerpadla lze umístit za kondenzační jednotku topný registr. Ventilátor žene teplý vzduch, ohřátý v kondenzátoru a v topném registru, do pracovní komory, kde ohřívá vsádku a přebírá její vlhkost. Jelikož se jedná o uzavřený okruh, následně vzduch proudí přes chladicí agregát, kde se prudce ochladí, vlhkost obsažená ve vzduchu z kondenzuje a je odváděna do kondenzační jímky. U sušícího média tak dojde k poklesu relativní vlhkosti a je dále hnáno do kondenzátoru, kde získá energii potřebnou k pojmání vlhkosti z vsádky, popřípadě získá dodatečnou energii v přidavném topném registru. Tento proces cirkulace se opakuje až do doby, kdy je vsádka vysušená. [31] [32] [33]



Obrázek 19 Kondenzační sušárna

Stejně jako u komorové sušárny je provoz periodický. Doba sušícího cyklu je v porovnání s klasickou komorovou sušárnou až dvakrát delší. Výhodou je nižší energetická náročnost sušení při využití sušárny s kondenzační jednotkou, protože standardně pracuje s teplotami v rozmezí 0°C – 35°C. Pokud je jednotka vybavena topným registrem, pracují sušárny



s teplotou do 70°C, kdy je stále zajištěna skvělá rentabilita z pohledu energetické bilance. Používají se převážně pro sušení tvrdých dřevin. [31]

#### 4.1.4 Páternosterová sušárna

Jedná se o sušárnu, kterou tvoří tepelně izolovaná sušicí komora, konstruovaná do výšky. Uvnitř sušicí komory je vestavěn nosný rám, na kterém je připevněný dopravníkový mechanismus, osazený policemi typu páternoster. Sušicí komora může být rozdělená do tří clon: ohřev, výdrž na teplotě a chlazení. V dolní části sušárny bývají umístěny otvory pro vkládání a vykládání vsádky. Tyto otvory jsou obvykle uzavírány tepelně izolovanými vraty, která jsou ovládána hydraulicky, pneumaticky nebo mechanicky. Sušárny jednoduchého typu, které neobsahují jednotlivé zóny, mají na boční straně tepelně izolovanou komoru, vybavenou tepelným výměníkem. Ventilátor žene sušicí médium přes komoru, obsahující tepelný výměník, zde získá vzduch potřebnou energii k sušicímu procesu. Následně vzduch proudí směrovými žaluziemi pro usměrnění proudu sušicího vzduchu na vsádku. Cirkulace vzduchu může probíhat v uzavřeném obvodu, nebo je vlhký vzduch v určitém poměru odváděn do okolí výrobní haly, případně je nuceně odsáván ventilátorem. [31] [32]



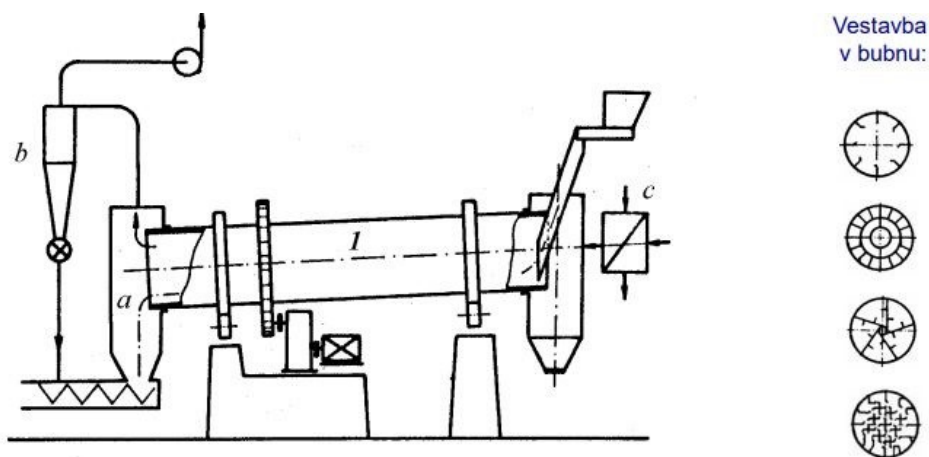
Obrázek 20 Páternosterová sušárna [31]

Vlhká vsádka je postupně zakládána na police, které se pohybují určitou rychlostí. Zakládání vsádky může probíhat krokově, takže se celý dopravník zastaví na dobu

potřebnou k založení, nebo je možné při zakládání pomocí automatického ramene celý proces nastavit tak, že nedochází k přerušování chodu dopravníku. Pracovní režim sušárny je tedy periodicky kontinuální, nebo kontinuální. Následně police s vlhkou vsádkou projíždí sušicí komorou, kde cirkuluje sušicí vzduch, který postupně absorbuje vlhkost. Doba provozu se zpravidla pohybuje v řádu minut až hodin. Záleží na povaze vsádky a nastavené rychlosti dopravníku. Teplota sušení bývá v rozmezí  $80^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ . Tento typ sušáren je vhodné používat pro vysoušení, vulkanizaci, vytvrzování povrchových vrstev, vysoušení granulátu, zahořování elektrosoučástek, umělé stárnutí hliníku a jeho slitin a pro mnoho dalších aplikací. [31] [32] [34]

#### 4.1.5 Bubnová sušárna

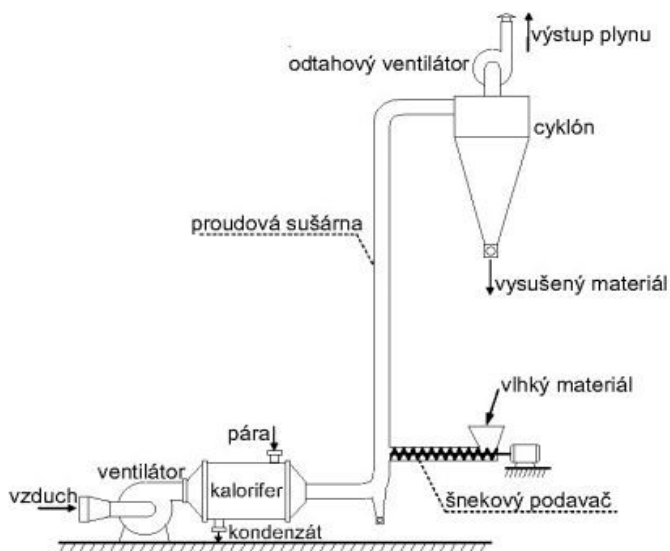
Hlavní částí je válcový buben s mírně skloněnou axiální osou, který je uložen na nosných vodících kladkách. Průměr bubnu se pohybuje v rozmezí 1 až 3 m a rychlost rotace běžně bývá okolo  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Otočný pohyb je vykonáván prostřednictvím ozubeného kola, umístěném na vnějším průměru bubnu. Pohon bubnu je elektromotorický. Uvnitř bubnu je obvykle zabudována vestavba, která zajistí větší povrchový styk sušeného materiálu a sušicího média. Před vstupní částí bubnu se nachází spalovací komora, ve které se ohřívá sušicí vzduch, který následně proudí vstupní částí do bubnu. Na výstupní části bubnu je umístěn odtahový ventilátor, za kterým se nachází odlučovač. Vlhký materiál je podáván do bubnu v horní části, rotací s působením vestavby bubnu a prouděním sušicího vzduchu postupuje k výstupnímu konci. Usušený materiál vypadává do sběrné komory. Vlhký vzduch se odsává přes odlučovač. Režim provozování je kontinuální. Doba sušení se liší v závislosti na charakteru sušeného materiálu, obvykle bývá v řádu několika desítek minut. [24] [31]



Obrázek 21 Schéma bubnové sušárny [24]

#### 4.1.6 Proudová sušárna

Hlavní částí je sušící komora v podobě potrubní věže. Na vstupu je umístěn ventilátor, který je připojen ke kaloriferu. Následuje potrubní věž, do které ve spodní části vstupuje šnekový podavač, který dodává do systému vlhký materiál. Konec věže následně ústí do odlučovače, který je osazen odtahovým ventilátorem. [31] [35]



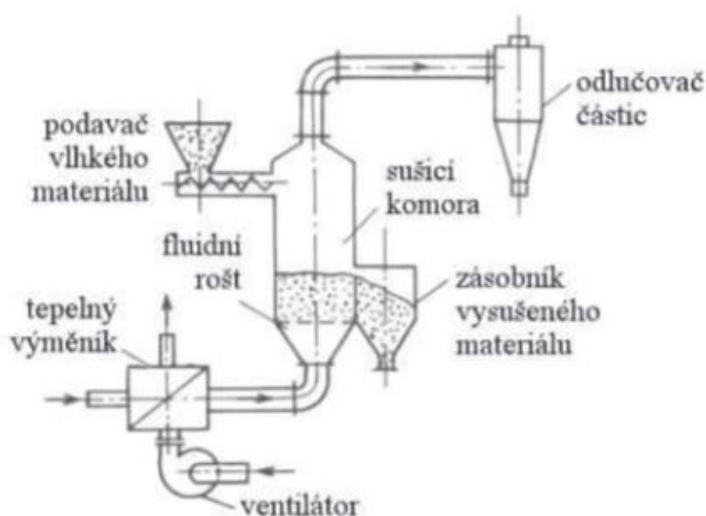
Obrázek 22 Schéma proudové sušárny [31]

Ventilátor žene vzduch přes kalorifer, kde se zahřeje a dále pak do sušící věže. Na jejím začátku vstupuje do proudu vzduchu vlhký materiál, dávkovaný šnekem. Sušící médium materiál suší a zároveň dopravuje do odlučovače, kde se oddělí ovlhčený vzduch od sušiny. Ovlhčený vzduch odchází do oblasti výrobní haly odtahovým ventilátorem. Režim provozu je kontinuální. Doba sušení se z pravidla pohybuje v řádu několika desítek sekund.

#### 4.1.7 Fluidní sušárna

Hlavní částí je sušící komora, která obsahuje fluidní rošt. Fluidní sušárny mohou být jednostupňové nebo vícestupňové. Vícestupňová sušárna obsahuje více sušících komor s fluidními rošty. Na vstupu se nachází ventilátor s tepelným výměníkem, z kterého je vedeno potrubí do sušící komory pod fluidní rošt. V oblasti nad fluidním roštem je umístěn přepad do zásobníku pro vysušený materiál. Součástí fluidní sušárny je rovněž šnekový dopravník, který dávkuje vlhký sypký materiál na fluidní rošt. Ve vrchní části sušárny se nachází potrubní vedení a odlučovač. [31] [33]

Ventilátorem je do sušárny dodáván sušící vzduch, který následně proudí tepelným výměníkem, kde získává energii potřebnou k sušení. Dále proudí do sušící komory přes fluidní rošt. Na fluidní rošt je šnekovým dopravníkem dávkován suchý materiál. Teplý vzduch prochází fluidním roštem a vlhkým materiálem. Materiál jde do vzosu a je vysušován. Většina vysušeného materiálu padá přepadem do rezervoáru určenému ke skladování suchého materiálu. Jemné částice sušeného materiálu proudí spolu se sušicím vzduchem do odlučovače, kde se oddělí. Režim provozu fluidní sušárny může být jak periodický, tak i kontinuální. Doba sušení v závislosti na charakteru sušeného materiálu se pohybuje v řádu sekund do desítek minut. [31] [33]



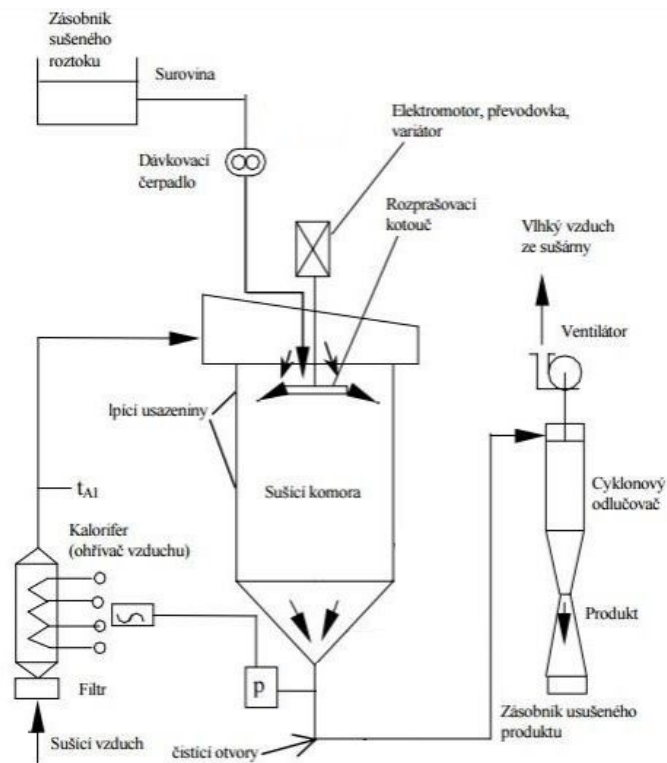
Obrázek 23 Schéma fluidní sušárny [31]

#### 4.1.8 Rozprašovací sušárna

Hlavní částí je sušící komora v podobě svislého válce, který je v dolní části kónický. Do sušící komory je zaústěna násypka, která je rotačně uložena a na jejím konci je umístěna tryska nebo rotační kotouč. Pracovní prostor obsahuje přepážky, které usměrňují proudění sušícího vzduchu a pohyb sušeného materiálu. Na kónické části sušící komory jsou rotačně uložena ramena s lopatkami, které seškrabávají usušený produkt. V horní části sušící komory je vstup pro sušící vzduch, který je dodáván ventilátorem přes tepelný výměník. Na výstupu kónické části se nachází potrubí, kterým odchází materiál spolu se sušicím vzduchem. Usušený produkt se následně odděluje od sušícího vzduchu v cyklonu. Ovlhčený vzduch odchází do okolí haly, usušený produkt padá do zásobníku.

Principem sušení rozprašovací sušárny je transformovat kapaliny na suchý prášek. Kapalina je desintegrována na malé kapičky pomocí rotačního kotouče nebo trysky.

Kapičky následně přicházejí do styku se sušícím vzduchem. Následuje velmi rychlé vypaření vody. Doba sušení dispergované kapaliny je velice krátká, obvykle několik sekund. Provoz rozprašovací sušárny je kontinuální. Používá se v potravinářském průmyslu pro sušení mléka, instantní kávy, čaje a mnoha dalších potravin. V plastikářském průmyslu se využívá při sušení roztoku PVC. [31] [32] [33]



Obrázek 24 Schéma rozprašovací sušárny

## **II. *PRAKTICKÁ ČÁST***

## 5 CÍLE PRÁCE

- Popsat stávající technologii sušiček používaných k sušení jader opatřených lihovými nátěry.
- Provést měření a následnou analýzu sušicího procesu u jader opatřených vodním nátěrem.
- Provést měření a následnou analýzu sušicího procesu u jader opatřených lihovým nátěrem.
- Porovnat výsledky měření a definovat míru potřebného navýšení kapacit sušiček při přechodu na vodní nátěr.
- Zkonstruovat návrh nové sušárny, navržený za účelem pokrytí taktů vstřelovacích strojů, snížení spotřeby energie a úspory půdorysné plochy.
- Vypočítat maximální hmotnostní úbytek vlhkosti za jednotku času u navrhované sušárny a deklarovat tak, že výkon sušárny je dostatečný.
- Na základě výpočtů optimalizovat výkon ventilátorů navrhované sušárny.
- Provést ekonomické zhodnocení případné implementace navrhované sušárny do provozu formou grafu návratnosti investice.

## 6 STÁVAJÍCÍ SUŠIČKY JADER

V současné době jsou využívány dvě konvektivní komorové periodické sušárny pro sušení jader po aplikaci lihovým žáruvzdorným nátěrem. Tepelná energie potřebná k sušení je dodávána plynovým hořákem, který je možné pouze manuálně regulovat pomocí ventilu. Sušičky neobsahují žádná čidla, ani regulační prvky, díky kterým by bylo možné proces řídit. Sušičky neobsahují ani přísávací klapku s pomocným ventilátorem, který by do oběhu dodával suchý vzduch z okolního prostoru. Vlivem absence řídicích prvků a potřebou regenerovat sušící vzduch jsou sušičky při sušení neustále pootevřeny. Díky tomu sice dochází k regeneraci sušícího vzduchu, ale zároveň dochází k značným ztrátám tepla do okolí vlivem komínového efektu. Implementací řídicích prvků, doplněním regenerační soustavy a změnou vnitřní konstrukce sušiček by bylo docíleno efektivnějšího a hospodárnějšího sušení, ale patrně by ani tak nebyly pokryty potřeby výroby a po zvážení nákladů na úpravy se zohledněním poklesu výroby při nutné odstávce zařízení, byla tato možnost zavržena.

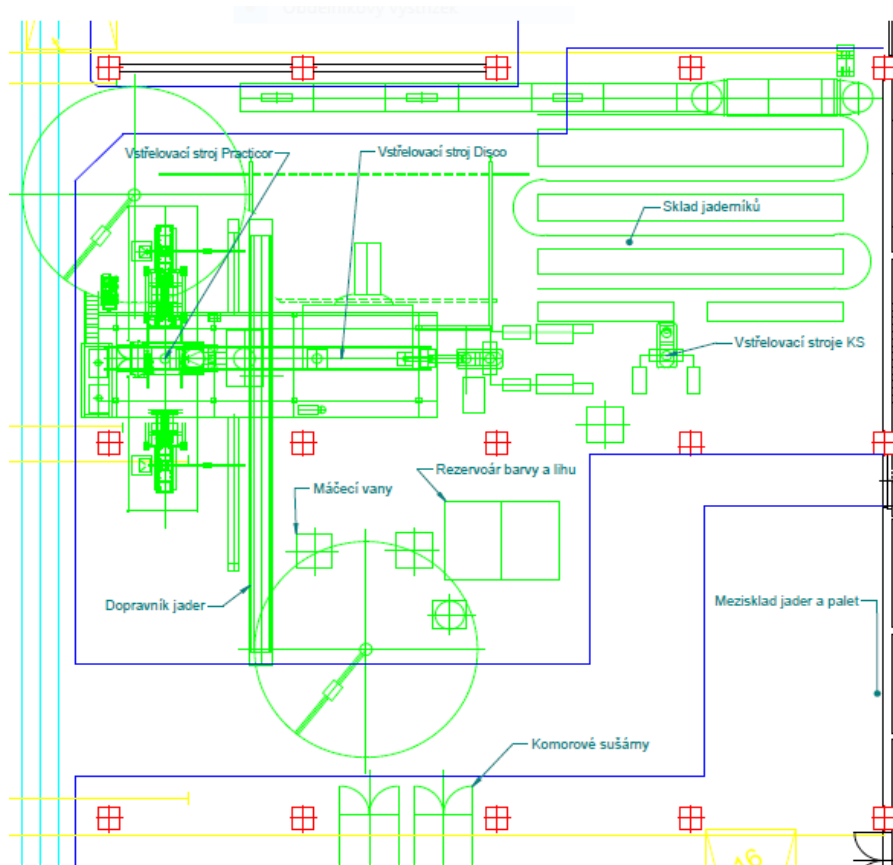


*Obrázek 25 Stávající komorová sušárna*



## 6.1 Popis pracoviště

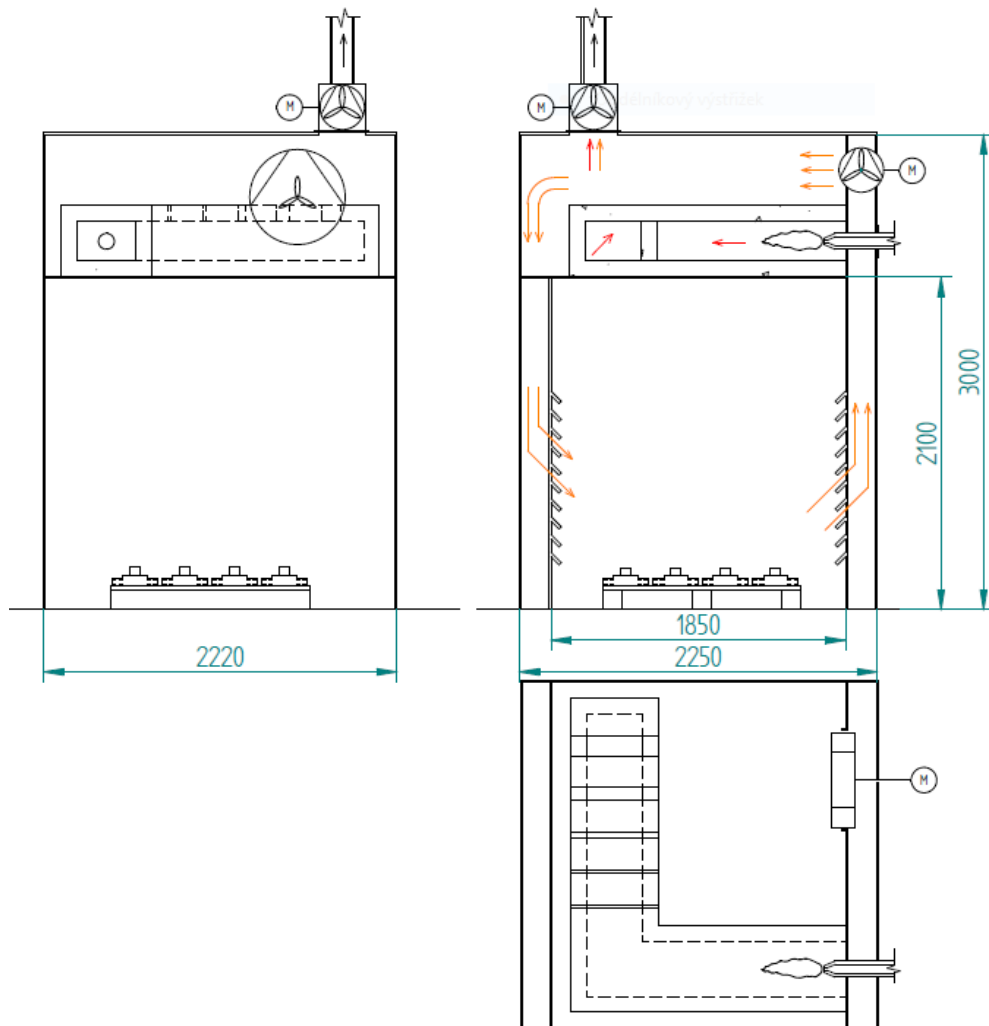
Jaderna strojní formovny vyrábí jádra pro automatickou formovací linku George Fischer. Je koncipovaná jako samostatná výrobní jednotka. Ve venkovních silech je skladováno ostřívo, které se dopravuje pneumatickou dopravou do přípravný jádrové směsi, která je uložena na konstrukci nad vstřelovacími stroji. Pod přípravnou jádrové směsi se nacházejí celkem čtyři vstřelovací stroje. Vstřelovací stroj Practicor je určen pro výrobu rozměrnějších jader. Stroj Disco obsahuje otočný stůl, na který je možné upnout tři kusy jaderníku a každá pozice vykonává jinou fázi vstřelovacího cyklu, tedy vstřelování, vytvrzování a vyhození jader. Dále jsou používány dva vstřelovací stroje KS pro výrobu méně rozměrných jader. Mezi strojem Practicor a Disco je vyvážecí dopravník, který dopravuje vyrobená jádra k máčecím vanám, kde se jádra namočí do žáruvzdorného nátěru a položí se na palety. Na strojích KS se jádra po vstřelení vkládají do pojízdného regálu a následně se dopravují k máčecí vaně, kde jsou opatřeny nátěrem. Následně jsou jádra na paletách vkládána do sušáren, popřípadě do prostoru mezioperačního skladu. Po vysušení jsou jádra dopravována do skladu s kontrolovaným klimatem, odkud jsou odebírána dle potřeby formovací linky.



Obrázek 26 Layout strojní jaderny

## 6.2 Konstrukce stávajících sušiček

Jak již bylo zmíněno, energie potřebná k ohřevu sušicího vzduchu je generovaná spalováním plynu. Sušička je rozdělena na dvě komory. Horní komora obsahuje svařený kanál tvaru “L“, který je vyložený šamotovými segmenty. V první části je spalínový kanál celkově uzavřen šamotovými segmenty, v další části jsou horní šamotové segmenty kanálu od sebe navzájem odsazeny a vzniká mezi nimi mezera, která se po délce kanálu zvětšuje. Nad koncem spalínového kanálu je ventilátor, který odebírá spaliny spolu se sušicím vzduchem a odvádí je mimo prostor výrobní haly. V horní komoře je dále ventilátor, který vytváří cirkulaci sušicího vzduchu a žene vzduch přes spalínový kanál. Spodní sušicí komora je určena pro uložení vsádky. Po bocích sušicí komory jsou kanály, kterými proudí cirkulující vzduch a je usměrňován na vsádku. Zjednodušený náčrtek se základními rozměry je znázorněn na obrázku 19.



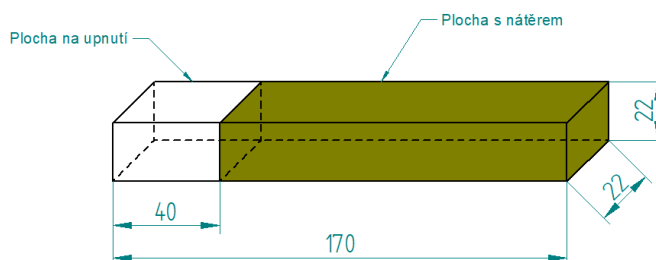
Obrázek 27 Stávající sušárna

### 6.3 Měření hmotnostního úbytku vlhkosti vodního nátěru

Pro popsání sušicího procesu na stávajících sušárnách, bylo nezbytné provést měření úbytku vlhkosti ze sušeného jádra do sušicího vzduchu vlivem konvektivního mechanismu difuze a sdílením hmoty v průběhu sušicího cyklu. Toto měření posloužilo jako podklad pro zkonstruování sušicí křivky, která nám popisuje dynamiku sušicího procesu.

#### 6.3.1 Zkušební jádro

Pro zjednodušenou manipulaci v rámci měření byla navržena zkušební jádra, pro která byl vyroben jaderník kompatibilní s technologií cold-box. Následně bylo vstřeleno 24 zkušebních vzorků o rozměrech znázorněných na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 28 Zkušební jádro

#### 6.3.2 Odstranění dimethylisopropylaminu ze zkušebních vzorků

Po odstranění otřepů, sražení ostrých hran a očištění zkušebních vzorků bylo nezbytné jádra označit a zbavit je zbytkového aminu, který na sebe váže vlhkost a mohl by způsobovat nepřesnosti v měření. Jádra byla vložena do laboratorní sušárny MERMET UNB 200 na dobu 120 minut při teplotě 120 °C. Následně byla jádra ponechána k vychladnutí v místnosti s kontrolovanou vlhkostí vzduchu.



Obrázek 29 Laboratorní sušička MEMMERT UNB 200

### 6.3.3 Příprava žáruvzdorného nátěru

Jedná se o vodou ředitelný žáruvzdorný nátěr od firmy ASK chemicals s označením MIRATEC TS 417, který byl naředěn v poměru 70 % vody a 30 % pevné látky dle pokynů výrobce. Bylo provedeno důkladné promíchání, následně byla změřena dynamická viskozita za použití Fordova pohárku s průměrem výpusti 4mm. Doba potřebná k vyprázdnění pohárku byla 11,9 s. Následně byl zvážen 1 l suspenze. Hmotnost litru suspenze byla 1368 g.



Obrázek 30 Měření viskozity Fordovým pohárkem

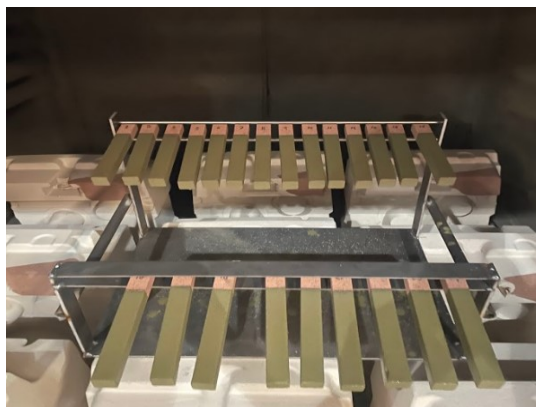
### 6.3.4 Měření úbytku hmotnosti v průběhu sušícího procesu

Po přípravě nátěrové hmoty a výrobě přípravku bylo možné provést měření úbytku hmotnosti na zkušebních vzorcích. Před aplikací nátěru byla změřena teplota okolí  $t_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost okolí  $\varphi_o = 40$ . Každý vzorek byl ponořen do nátěrové hmoty po dobu 7 s a následně byl zasazen do přípravku. Následovalo měření hmotnostního úbytku po časovém úseku 240 s. Vzorek č. 1 byl zvážen bezprostředně po namočení tedy v čase  $\tau = 0$  s a reprezentuje tak hmotnost nátěrové hmoty před začátkem sušícího procesu. Před vložením vzorků do sušící komory byl zkontrolován stav plynoměru, aby bylo možné stanovit energetickou náročnost sušícího procesu. Vážení suchých i vlhkých vzorků bylo provedeno na laboratorní elektronické váze Precisa 1620 C. Hmotnostní difference suchých jader jsou způsobeny nerovnoměrným vstřelením jádrové směsi, ale to vzhledem k charakteru pokusu není důležité. V níže uvedené tabulce jsou zaznamenané hodnoty úbytku hmoty v čase.  $\tau$  [min] reprezentuje dobu sušení daného vzorku,  $m_s$  [g] reprezentuje hmotnost suchého vzorku,  $m_v$  [g] reprezentuje hmotnost namočeného vzorku

v daném čase,  $\Delta m$  [g] popisuje diferenci mezi hmotností suchého jádra a namočeného jádra a reprezentuje tak hmotnost nátěrové hmoty v daném čase. Dále byla v průběhu sušení měřena teplota povrchu zkušební vzorku  $T$  [°C] pomocí termo kamery TESTO 870 s nastavenou emisivitou  $\varepsilon = 0,92$ . U všech vzorků byla namočena stejná plocha  $A = 11\,924\text{ mm}^2$ . V průběhu experimentu byla měřena teplota uvnitř sušičky v blízkosti vzorků, teplota sušicího prostředí  $T_s = 70\text{ °C}$ .

Č. vzorku	$\tau$ [min]	$m_s$ [g]	$m_v$ [g]	$\Delta m$ [g]	$T$ [°C]
1	0	131,78	142,10	10,32	19,60
2	4	127,90	138,01	10,11	33,80
3	8	129,76	139,13	9,37	35,60
4	12	125,51	134,61	9,10	37,20
5	16	123,46	132,15	8,69	37,50
6	20	131,01	138,49	7,48	38,40
7	24	125,67	133,03	7,36	40,90
8	28	128,09	135,15	7,06	42,70
9	32	121,35	128,13	6,78	47,70
10	36	130,18	136,71	6,53	52,30
11	40	132,80	138,50	5,70	55,90
12	44	117,59	122,89	5,30	58,50
13	48	130,30	135,38	5,08	62,60
14	52	118,69	123,65	4,96	64,70
15	56	131,45	136,20	4,75	67,30
16	60	130,68	135,21	4,53	69,20
17	64	127,96	132,49	4,53	69,50
18	68	125,63	130,27	4,64	69,70
19	72	127,50	131,99	4,49	69,80
20	76	127,45	131,95	4,50	69,60
21	80	128,49	133,05	4,56	69,80
22	84	121,97	126,43	4,46	69,80
23	88	127,03	131,50	4,47	69,60
24	92	131,74	136,11	4,37	69,90

*Tabulka 2 Měření hmotnostního úbytku v průběhu sušení vodních nátěrů*



Obrázek 31 Vzorky v sušící komoře

Po zvážení posledního vzorku bylo nutné odečíst stav plynoměru. Za 92 minut sušení bylo spotřebováno  $4,92 \text{ m}^3$  zemního plynu. K vysušení materiálu bylo zapotřebí  $3,22 \text{ m}^3$  zemního plynu. Lze tedy vypočítat množství dodané energie dle rovnice:

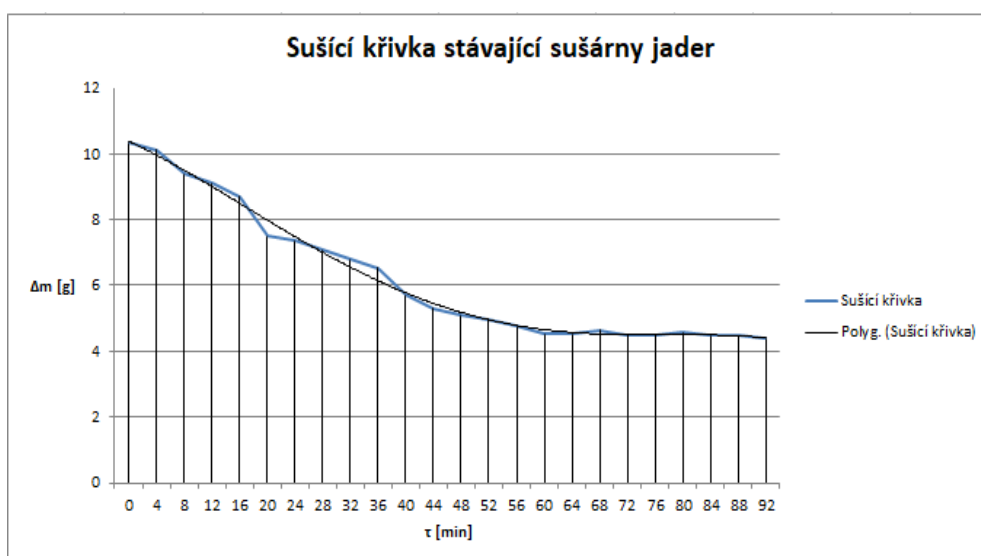
$$Q = V_p \cdot k \cdot H_s \quad 5.1$$

$$Q = 3,22 \cdot 1 \cdot 10,5 = 33,8 \text{ kWh} \quad 5.2$$

Kde  $Q$  [W] je množství dodané energie,  $k$  [–] je přepočtový objemový koeficient a  $H_s$  [kWh ·  $\text{m}^{-3}$ ] je objemové spalné teplo. Příkon stávající sušárny je 33,8 kWh.

### 6.3.5 Stanovení sušící křivky

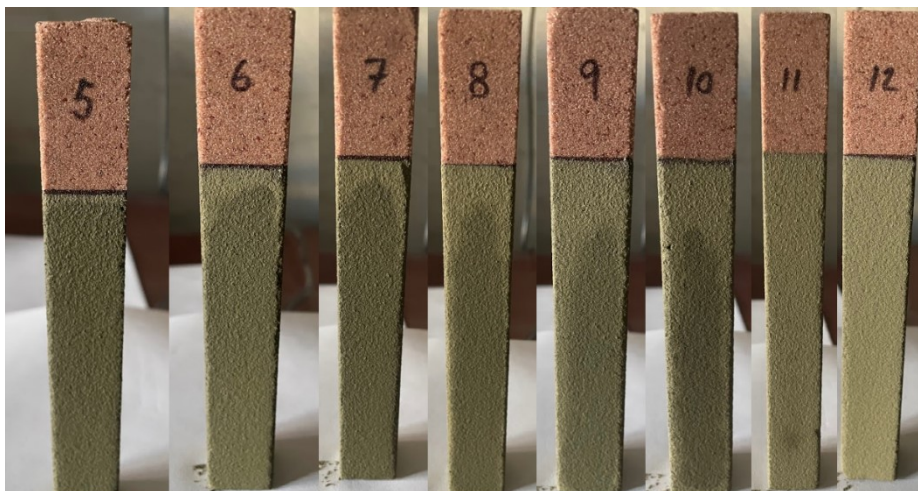
Ze získaných dat bylo možné sestavit sušící křivku, jako závislost úbytku hmotnosti na čase.



Obrázek 32 Sušící křivka vodních nátěrů

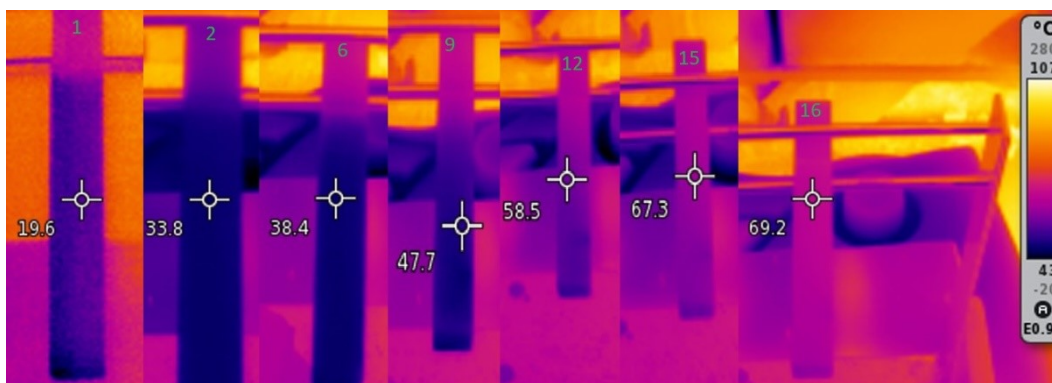


Během měření byl zaznamenáván vizuální úbytek vlhkosti na povrchu zkušebních jader. Z pořízených fotografií je patrné, že povrch začal viditelně schnout po 16 minutách sušení a byl kompletně vyschlý po 44 minutách sušicího procesu.



*Obrázek 33 Vizuální úbytek vlhkosti*

Ze sušicí křivky je patrné, že po 44 minutách sušení ještě stále docházelo k úbytku vlhkosti a nárůstu teploty povrchu zkušebních vzorků. Povrch vzorků dosáhl ustálené teploty až po uplynutí 60 minut sušení. Je tedy patrné, že po 60 minutách sušení už nedocházelo k žádnému úbytku vlhkosti.

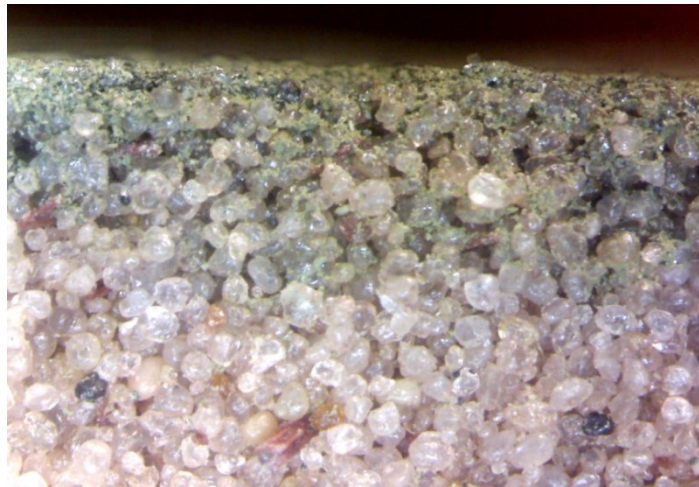


*Obrázek 34 Teplota povrchu zkušebních vzorků*

### **6.3.6 Kontrola kvalitativních požadavků nátěrových hmot**

Na vzorku č. 16 byla po vychladnutí zkontrolována tloušťka nátěrové hmoty. V technickém listu nátěrové hmoty je stanovena optimální tloušťka nátěru na  $250 \mu\text{m}$ . Pro kontrolu tloušťky nátěru byl využit nerezový hřeben pro měření tloušťky nátěrové hmoty. Byla naměřena tloušťka  $200 \mu\text{m}$ , to znamená, že by bylo vhodné zvětšit podíl pevné látky v suspenzi. Dalším parametrem, který je vhodné zkontrolovat, je hloubka penetrace nátěrové hmoty do jádrové směsi. Ideální hloubka penetrace je čtyřnásobek průměru zrna

ostřiva. Zkušební vzorek byl rozříznut ruční pilkou a byl pořízen záznam z přibližovací kamery. Obrázek řezu zkušebního vzorku je zobrazen níže.



*Obrázek 35 Hloubka penetrace*

Z obrázku je patrné, že nátěr penetroval do hloubky 4 - 6násobku průměru zrna, což koreluje se zjištěním, že by suspenze měla obsahovat více pevné látky ve směsi.

Posledním a stěžejním parametrem, který bylo zapotřebí zkontrolovat na vzorku č. 16, byl procentuální podíl vlhkosti ve svrchní vrstvě zkušebního vzorku. Bylo nutné odstranit svrchní vrstvu nátěru s ostřivem o celkové hmotnosti 10 g, aby bylo možné provést kontrolu na váze vlhkosti Precisa HA60.



*Obrázek 36 Měření podílu vlhkosti na váze Precisa HA60*



Výsledný podíl vlhkosti ve svrchní vrstvě zkušebního jádra byl 0,36 %. To znamená, že jádro je dobře vysušeno a je možné ho založit do formy.

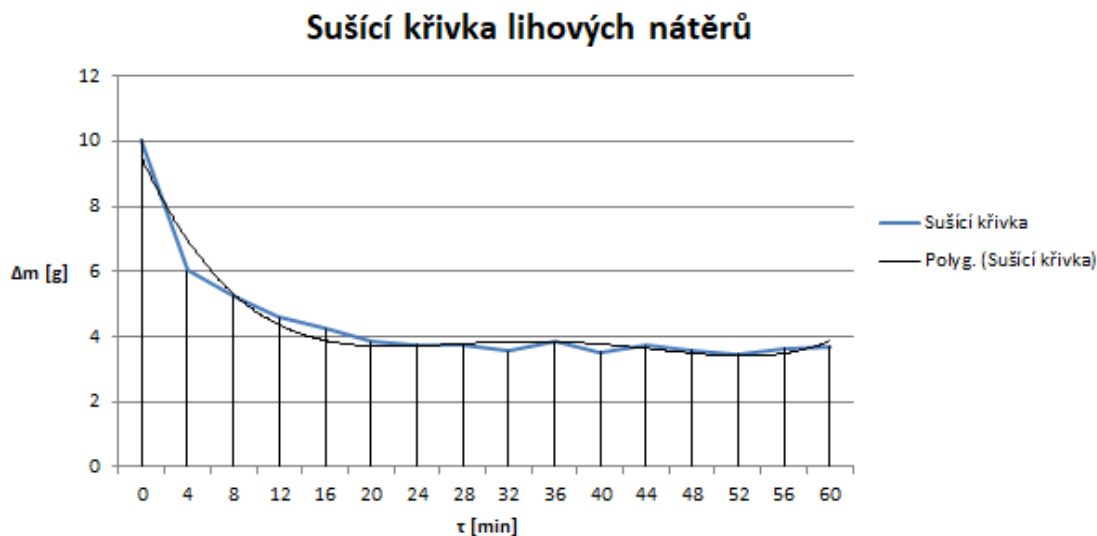
#### 6.4 Měření hmotnostního úbytku vlhkosti lihového nátěru

V současné době se ve výrobním procesu používají lihem ředitelný žáruvzdorný nátěr TENOSIL 301 MPX od firmy Foseco. Stávající sušárny dokáží pokrýt takt vstřelovacích strojů. Aby bylo možné navrhnout technologii pro sušení vodních nátěrů, bylo nezbytné zjistit, o kolik se prodlouží čas sušení při použití vodních nátěrů oproti nátěrům lihovým. Bylo tedy nezbytné provést stejný experiment za stejných podmínek jako v kapitole (6.3). Jelikož bylo předpokladatelné, že lihem ředitelné nátěry, budou schnout rychleji, bylo vyrobeno pouze 16 kusů zkušebních jader. Následný postup experimentu byl totožný. Byla změřena viskozita za použití Fordova pohárku s průměrem výpusti 4mm. Doba potřebná k vyprázdnění pohárku byla 12,8 s. Následně byl zvážen 1 l suspenze. Hmotnost litru suspenze byla 1100 g. Data získaná z měření, jsou uvedena níže.

Č. vzorku	$\tau$ [min]	$m_s$ [g]	$m_v$ [g]	$\Delta m$ [g]	$T$ [°C]
1	0	132,96	142,99	10,03	19,70
2	4	132,95	138,97	6,02	33,20
3	8	133,35	138,60	5,25	44,90
4	12	131,20	135,80	4,60	52,30
5	16	131,17	135,40	4,23	59,80
6	20	131,84	135,67	3,83	66,10
7	24	131,98	135,73	3,75	67,50
8	28	133,25	136,99	3,74	68,30
9	32	133,48	137,02	3,54	69,70
10	36	130,45	134,30	3,85	69,30
11	40	132,64	136,17	3,53	69,80
12	44	132,25	135,98	3,73	69,80
13	48	129,70	133,27	3,57	69,20
14	52	128,69	132,16	3,47	70,10
15	56	126,96	130,61	3,65	69,90
16	60	128,07	131,76	3,69	69,90

Tabulka 3 Měření hmotnostního úbytku v průběhu sušení lihových nátěrů

#### 6.4.1 Stanovení sušicí křivky



*Obrázek 37 Sušicí křivka lihových nátěrů*

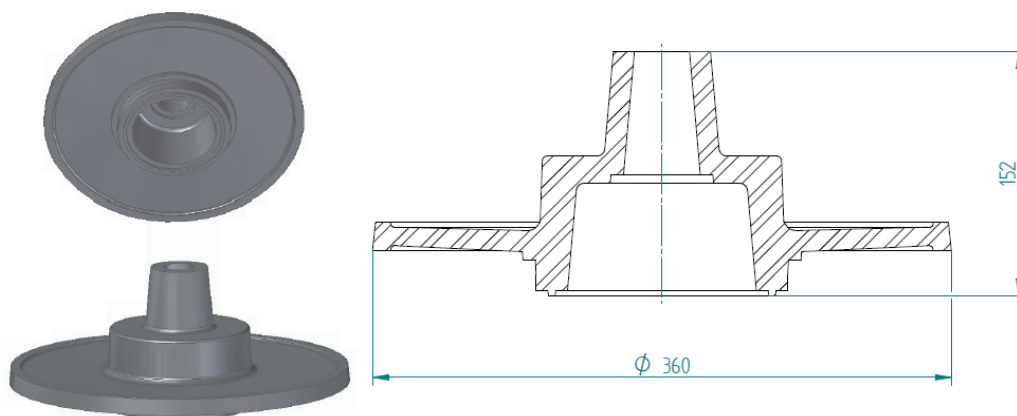
Na základě sušicí křivky je patrné, že po uplynutí 20 minut sušicího procesu již nedocházelo k úbytku vlhkosti a k výraznějšímu nárůstu teploty povrchu zkušební vzorku. Bylo tedy možné považovat vzorek za vysušený.

#### 6.5 Sumarizace výsledků měření

Ve stávajících sušárnách bylo provedeno měření úbytku vlhkosti v čase jak u vodních, tak u lihových nátěrových hmot. Čas potřebný k vysušení zkušební vzorku po aplikaci vodou ředitelného žáruvzdorného nátěru byl 60 min. Čas potřebný k vysušení zkušební vzorku po aplikaci lihového žáruvzdorného nátěru byl 20 min. Je tedy patrné, že vodní nátěry potřebují za stejných podmínek třikrát delší čas sušení, než lihové nátěry. Aby byla zachována plynulost výroby, je nezbytné, aby sušárny dokázaly pokrýt takt vstřelovacích strojů. Navrhovaná technologie musí tedy pracovat třikrát rychleji než technologie stávající.

## 7 NAVRŽENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE

Pro návrh správné a produktivní technologie je nezbytné definovat charakter výroby. Velký podíl produkce zastupují jádra pro výrobu brzdových kotoučů. Vzhledem k zakázkové naplněnosti můžeme říct, že jejich podíl na celkové produkci bude v čase růst. Druhů jader pro výrobu brzdových kotoučů je velké množství, ale rozměrově a váhově se výrazně neliší. Konstrukce sušárny bude navržena na základě rozměrů jádra brzdového kotouče, jehož náčrt je na obrázku níže.



Obrázek 38 Jádro brzdového kotouče

Parametry Jádra:

- Plocha fázového rozhraní jádra  $A = 298\,965\text{ mm}^2$ .
- Hmotnost suchého jádra  $m = 3\,312\text{ g}$ .
- Hmotnost namočeného jádra  $m_c = 3\,570\text{ g}$ .
- Hmotnost vlhkosti  $m_A = 150\text{ g}$ .

Na základě měření v kapitole (5.3) víme, že k vysušení zkušebních vzorků opatřených vodním žáruvzdorným nátěrem, bylo zapotřebí sušit jednu hodinu. Na základě zkušebního provozu s aplikací vodních nátěrů lze říct, že sušení probíhalo podobně jako při sušení zkušebních vzorků bez ohledu na velikost vsádky. Proto lze dále uvažovat jednu hodinu jako čas potřebný pro vysušení jedné vsádky.

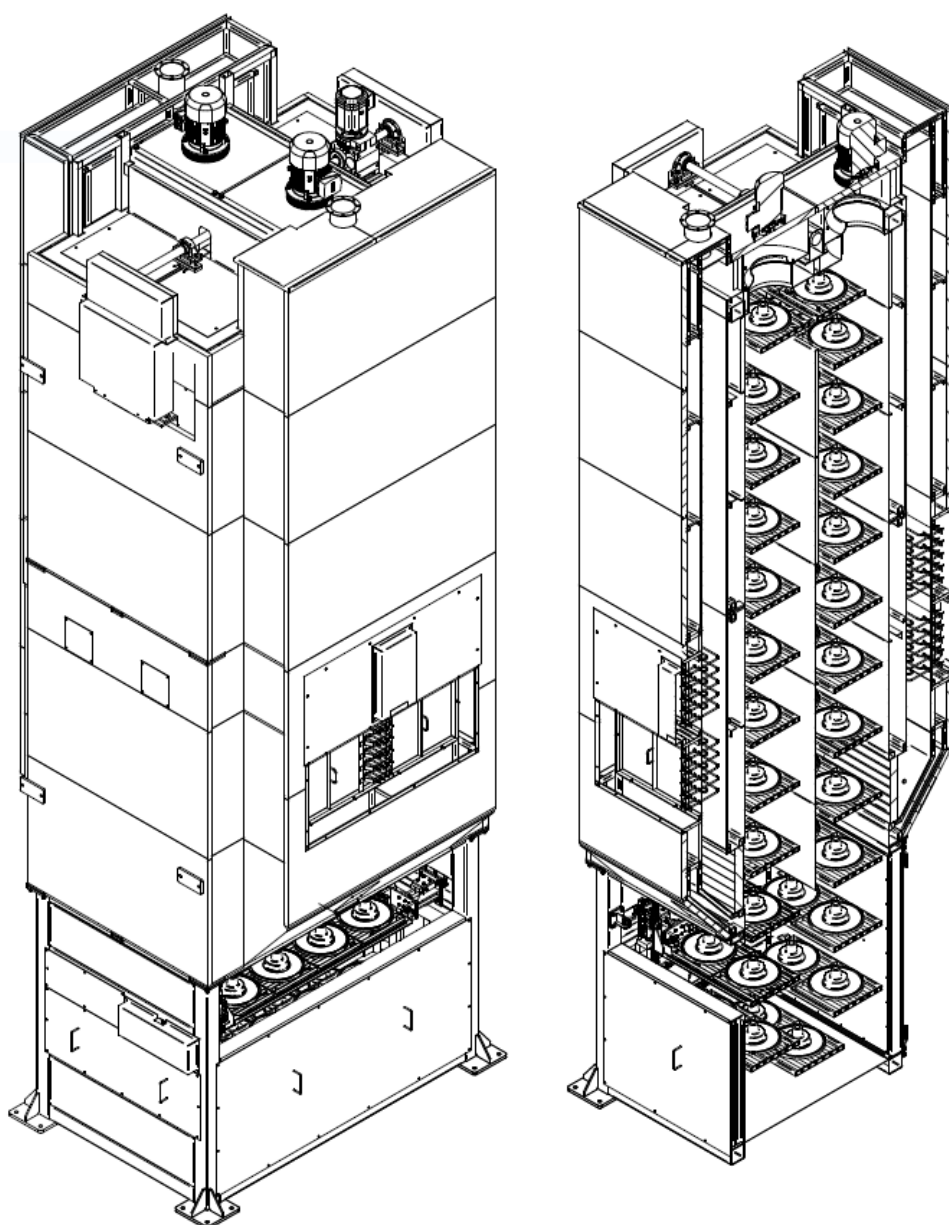
Vsádka se skládá ze 48 kusů jader umístěných na paletách v regálovém nosiči. Současná technologie se skládá z dvou komorových sušáren. Celková vsádka je tedy 96 kusů jader. Aby byl pokryt takt vstřelovacích strojů, je nezbytné navrhnout technologii, která dokáže

za stejnou časovou jednotku vysušit alespoň 288 kusů jader. Je tedy patrné, že musíme odstranit 43,2 kg vlhkosti za jednu hodinu sušení.

Vzhledem k charakteru výroby a zástavbové ploše slévárny se jako nejlepší možnost jeví kontinuálně pracující konvektivní sušárna konstrukce páternoster. Vzhledem k plynulosti kontinuálně pracujícího zařízení jistě dojde k zvýšení efektivity. Je pravděpodobné, že páternosterová sušárna bude pracovat hospodárněji, než stávající komorová sušárna, která pracuje s pootevřenými vraty. Eliminování tepelných ztrát bude mít příznivý vliv na ekonomiku výrobního procesu a zároveň i na samotný proces sušení.

## 7.1 Konstrukce páternosterové sušárny

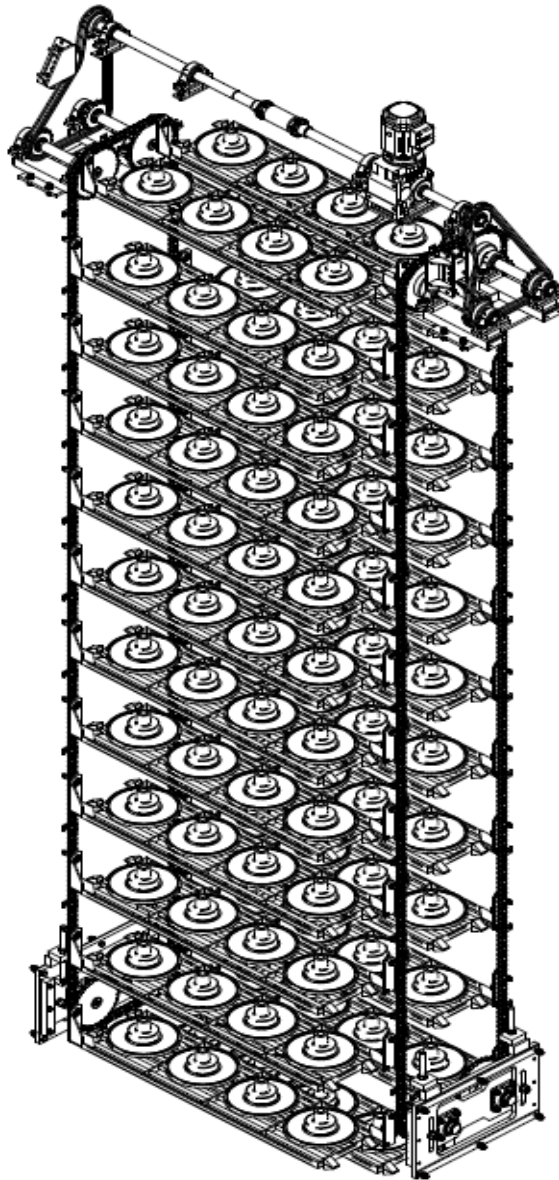
Sušárna je konstruovaná do výšky 7590 mm od země na základě výšky výrobní haly. Půdorysný rozměr sušárny bez nášlapu je 2848 mm x 2432 mm. Ve středové sušicí šachtě je umístěný řetězový dopravník, který je osazen 25 nosiči. Každý nosič nese 4 kusy jader. Pohyb řetězového dopravníku je generován elektromotorem. Rychlost dopravníku lze řídit přes frekvenční měnič. Středová šachta je rozdělena přepážkou a vytváří tak dvě sušicí šachty. Po bocích jsou umístěny dvě topné komory a každá z nich je osazena 20 kusy topných těles. Každé topné těleso má výkon 2 kW. V horní části jsou usazeny dva radiální ventilátory VSG 400-2-6,5. Výkon ventilátoru je regulovatelný pomocí frekvenčního měniče. Maximální výkon ventilátoru  $P_v = 6,5$  kW. Rozpětí ventilátorem generovaného objemového toku vzduchu  $Q_v = 3600$  až  $10800$   $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Každý ventilátor nasává vzduch z oblasti příslušné sušicí šachty a žene ho do příslušné topné komory. Každá topná komora má ve své horní části vyvedené potrubí, kterým uniká určitá část vlhkého vzduchu mimo prostor výrobní haly. Množství odváděného vlhkého vzduchu je regulované manuální klapkou umístěnou na potrubí. Sušárna tedy obsahuje dva okruhy, které jsou regulovatelné a na sobě nezávislé. Ve spodní části je vstupní okno sloužící k plnění a odebírání materiálu a zároveň slouží k přísávání určitého množství nového vzduchu. Nosná konstrukce sušičky je svařena z ocelového uzavřeného čtvercového profilu o rozměrech 120x120x6. K eliminování tepelných ztrát do okolí byla navržena konstrukce s dvojitou stěnou namísto použití izolace. Konstrukce, vytvářející dvojitou stěnu a sloužící jako nosič krycích pozinkovaných plechů o síle 2 mm, je svařena z ocelového uzavřeného čtvercového profilu 30x30x3. Sušárna obsahuje teplotní čidla, která snímají teplotu v určitých částech sušicí komory a regulují výkon otopů na základě nastavené teploty v řídicím programu.



*Obrázek 39 Navržená sušárna konstrukce páternoster*

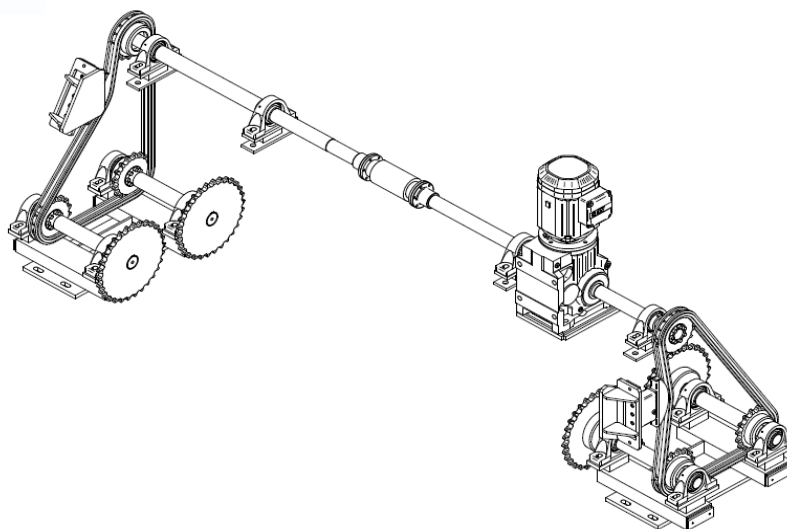
### **7.1.1 Řetězový dopravník**

Řetězový dopravník se skládá z pohonné jednotky, napínací jednotky, polic osazených jádry a poháněcího řetězu. Dopravník zajišťuje vykonávání oběžného pohybu typického pro páternoster a zajišťuje tak rovnoměrné sušení jader. Dopravník je konstruován tak, že jednotlivé palety obíhají sušicí komoru ve dvou řadách oddělených přepážkou. Každá řada představuje jeden okruh s vlastním ventilátorem a topnou komorou. Rychlost dopravníku je kontrolována snímačem otáček, který ve spolupráci s řídicím systémem a frekvenčním měničem řídí rychlost dopravníku. Redukováním otáček elektromotoru, který generuje otáčivý pohyb přenášený na hnací hřídel lze rychlost dopravníku zpomalit.



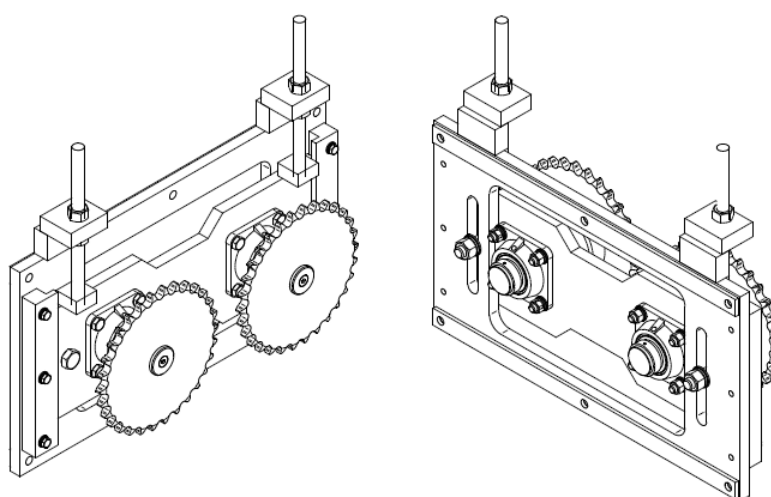
*Obrázek 40 Řetězový dopravník*

Pohonná jednotka: je složena z elektrického pohonu a převodovky uložených na hnací hřídeli, osazené řetězovými koly. Elektromotor je opatřený elektromagnetickou brzdou, která při výpadku ovládacího napětí zajistí dopravník proti pootočení. Hnací hřídel je dělená a spojená spojku, aby bylo možné provádět údržbu příslušné strany bez ohledu na stranu druhou. Otáčivý pohyb je přenášen na jednotku s ozubenými koly, uloženou na nosiči řetězem. Jednotka s ozubenými koly následně pohání řetěz osazený policemi s jádry. Správné dopnutí řetězu zajišťuje napínací člen. Řetězová kola pohonné jednotky jsou uložena pevně a nelze jimi posouvat a generovat tak pohyb k napnutí řetězu osazeného policemi s jádry. Všechny hřídele jsou uloženy v příslušných ložiskách, které je nezbytné v pravidelných intervalech mazat vazelínou.



*Obrázek 41 Pohonná jednotka*

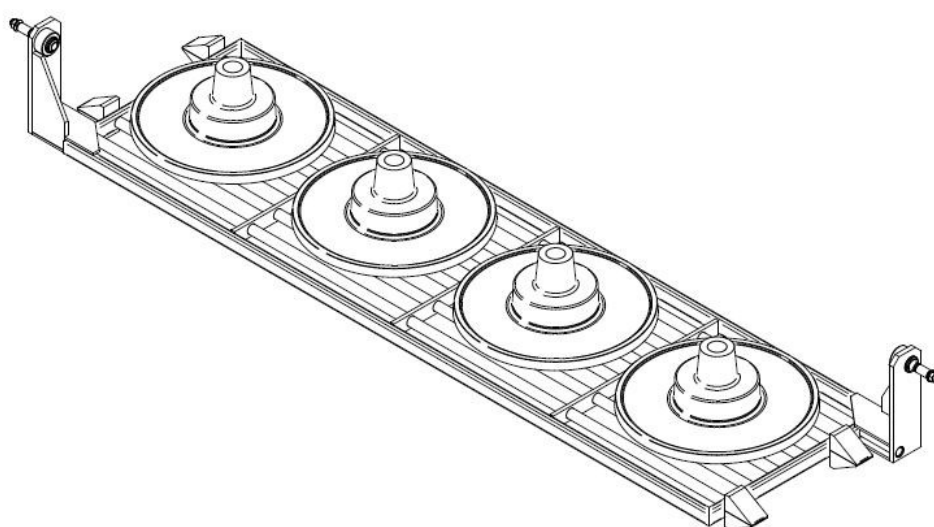
Napínací jednotka: Jednotka obsahuje ozubená kola, uložená v ložiskových domcích. Sestava rotačních členů je uložena na desce a její výšku je možné nastavovat pomocí dvojice šroubovic, které jsou umístěny na pevné části napínací jednotky. Pozice pohyblivé desky, potažmo řetězových kol, je vymezena drážkou s vodícími šrouby, které zároveň slouží k aretaci desky. Při dotahování šroubovic je deska tlačena směrem dolů a řetěz se napíná. Po napnutí je nezbytné zajistit desku dvojicí šroubů v drážce. Dále je vhodné zakontrovat matici napínací šroubovice, aby nedocházelo k jejímu povolení a byla tak zajištěna pozice řetězových kol a správné dopnutí řetězu.



*Obrázek 42 Napínací člen*

Paleta s jádry: Jedná se o svařenou konstrukci, která slouží jako nosič jader. Středové příčky byly navrženy z kulatého profilu, aby byl zajištěn minimální kontakt povrchu

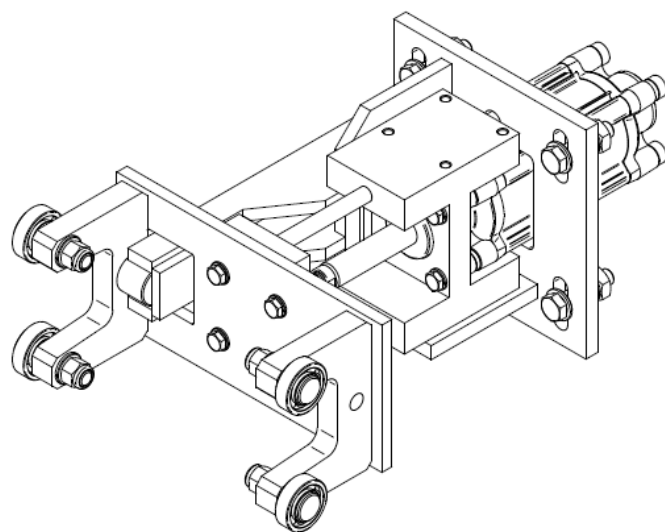
konstrukce s povrchem namočeného jádra a zároveň aby docházelo k co možná největšímu styku sušícího média se spodní plochou sušeného jádra. V protějších uhlopříčkách palety je navařena konzole. Obě konzole jsou opatřeny čepem uloženým v náboji. Dvojice čepů je z druhé strany uložena do spojovacího členu, který je součástí poháněcího řetězu, a čepy jsou zajištěny matkou. Čepy uložené v náboji zajišťují pootáčení palet při přejíždění v horní a spodní pozici dopravníku a drží tak paletu vždy v horizontální poloze vůči podlaze výrobní haly. Na bocích palet jsou navařeny klíny, které slouží k zajištění polohy aretačním mechanismem v oblasti pro nakládání vsádky.



*Obrázek 43 Paleta s jádrem*

Aretační mechanismus: Jedná se o sestavu, která je smontována s rámem stroje a slouží k aretaci palety v místě nakládání vsádky. Sestava je složená z pneumatického pístu, konzole svařené z plechových výpalků, vodícího profilu, který vede pohyblivý aretační člen pomocí kladky. Pohyblivý člen je spojen s pístnicí přes spojku v podobě plotny se závitem. Vedení pohyblivého aretačního členu je zajištěno pohybem kladky v “U“ drážce a pohybem vodících čepů skrz segment, ke kterému je přimontovaný pneumatický válec. Vodící čepy dále prochází otvorem v montážní plotně. Samotný pohyblivý člen se skládá z plotny a nosičů, které jsou opatřeny čtveřicí vodících kladek, které najíždí na navařené klíny palet s jádrem a zajistí tak jejich aretaci v místě vkládání vsádky. Montážní plotna je opatřena drážkami, aby bylo případně možné aretační mechanismus výškově nastavit.





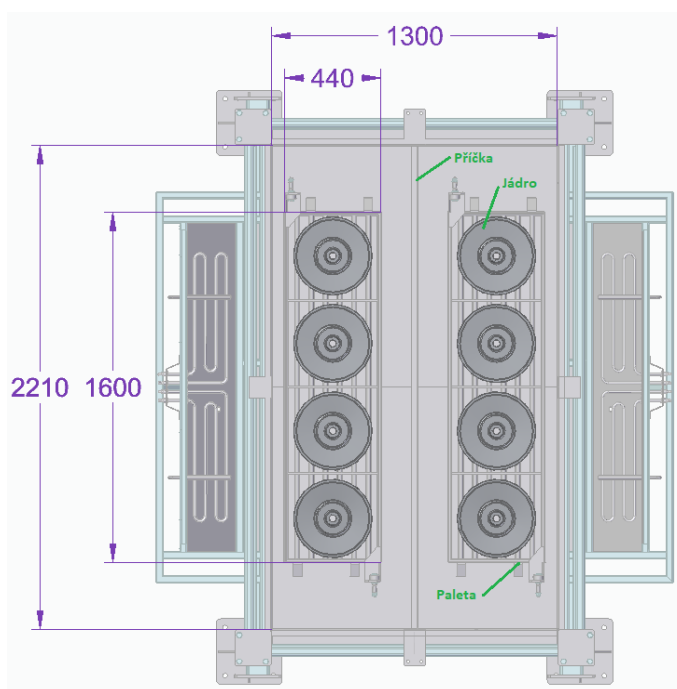
*Obrázek 44 Aretační mechanismus*

## 8 VÝPOČET HUSTOTY VLHKOSTNÍHO TOKU

V předchozí kapitole bylo stanovené minimální množství vlhkosti, které je nezbytné odstranit ze sušených jader, aby navržená technologie pokryla takt vstřelovacích strojů při přechodu na vodou ředitelné žáruvzdorné nátěry. Požadované minimální množství odstraněné vlhkosti za hodinu je 43,2 kg. V této kapitole bude vypočítán hmotnostní úbytek vlhkosti při plném výkonu sušárny a bude tak vyjádřena maximální kapacita navržené technologie. Následně bude sušicí proces optimalizován snižováním výkonu otopů a ventilace na hodnoty, které zaručí odstranění požadovaného množství vlhkosti při co nejmenších provozních nákladech.

### 8.1 Stanovení základních parametrů

Pro výpočet budou použity stejné parametry vzduchu v okolí sušárny, jako při provádění měření z kapitoly 6.3. Teplota okolí  $t_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost okolí  $\varphi_o = 40\%$ . Maximální výkon otopů  $P = 80\,000\text{ W}$ , maximální objemový průtok ventilátoru  $Q_v = 10800\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .



Obrázek 45 Řez sušárnou

Pro následující výpočty bylo nezbytné určit obsah plochy sušicí komory. Z výše znázorněného řezu je patrné, že obsah plochy sušicí komory  $S = 2,87\text{ m}^2$ . Stanovení obsahu plochy průmětů všech překážek v sušicí komoře (jádra, paleta a středová příčka), bylo provedeno za použití softwaru Solid Edge od firmy Siemens.  $S_p = 1,14\text{ m}^2$ .

Odečtením výše uvedených obsahů byl stanoven skutečný obsah plochy  $S_s$  [ $m^2$ ], kterým proudí sušící vzduch:

$$S_s = S - S_p \Rightarrow 2,87 - 1,14 = 1,73m^2 \quad 8.1$$

Smáčený obvod  $O$  [ $m$ ] byl vypočítán jako součet obvodů palet a obvodu středové příčky:

$$O = 2 \cdot (3,2 + 0,88) + 4,45 = 12,67m \quad 8.2$$

V této fázi bylo nezbytné spočítat charakteristický délkový rozměr  $l$  [ $m$ ]. V našem případě se charakteristický délkový rozměr spočítá dle vzorce:

$$l = d_{ekv} = \frac{4 \cdot S}{O} \Rightarrow \frac{4 \cdot 2,87}{12,67} = 0,91m \quad 8.3$$

## 8.2 Stanovení hustoty vlhkostního toku při plném výkonu sušárny

Stanovení objemového průtoku sušícího vzduchu  $Q_v$  [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]:

$$Q_v = 2 \cdot (10800) = 21600 m^3 \cdot h^{-1} \quad 8.4$$

Pomocí následujícího vzorce byla vypočítána rychlost proudění sušícího vzduchu v sušící komoře  $u$  [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$$u = \frac{Q_v}{S_s \cdot 3600} \Rightarrow \frac{21600}{1,73 \cdot 3600} = 3,47m \cdot s^{-1} \quad 8.5$$

Dalším krokem, byl výpočet Reynoldsova čísla  $Re[-]$ , které popisuje typ proudění sušícího vzduchu. Na základě kapitoly 2.6.1 byl využit následující vztah:

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \Rightarrow \frac{3,47 \cdot 0,91}{1,63 \cdot 10^{-5}} = 193594,2 \quad 8.6$$

Kinematická viskozita  $\nu$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] byla doplněna dle normy ČSN 73-0540-3 zpětnou iterací a odpovídá vzduchu o teplotě 32 °C. Ze získané hodnoty Reynoldsova čísla jasně vyplývá, že sušící médium v navrhované sušárně bude proudit laminárně.

Výpočet teploty sušícího vzduchu vychází ze vztahu:

$$P = Q_z + \dot{m}_s \cdot c_p \cdot (t_s - t_o) \quad 8.7$$

Kde  $\dot{m}_{vz}$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ] je hmotnostní průtok sušícího vzduchu,  $c_p$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] je tepelná kapacita,  $t_A$  [°C] je hledaná teplota sušícího vzduchu.

Po úpravě vznikl vztah:

$$P = u \cdot S_s \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_s - t_o) \quad 8.9$$

Z výše uvedené rovnice byla vyjádřena teplota sušícího vzduchu:

$$t_A = \frac{P}{u \cdot S_s \cdot \rho \cdot c_p} + t_o \Rightarrow \frac{80000}{3,47 \cdot 1,73 \cdot 1,15 \cdot 1007} + 20 = 31,45 \text{ °C} \quad 8.10$$

Hustota  $\rho$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] a tepelná kapacita  $c_p$  byly doplněny dle normy ČSN 73-0540-3 zpětnou iterací a odpovídá vzduchu o teplotě 32 °C

Z výsledku vyplývá, že při plném výkonu otopů a ventilace bude mít sušící vzduch teplotu 31,45 °C. Ventilátor žene vzduch přes otopnou sestavu vysokou rychlostí. Vzduch nedokáže pojmout tolik energie potřebné k nárůstu teploty a to je důvodem výsledné nízké teploty.

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_k$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] byl vypočítán následovně:

$$\alpha_k = \frac{0,644 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda}{l} \quad 8.11$$

$$\alpha_k = \frac{0,644 \cdot 193594,2^{0,8} \cdot 0,728^{\frac{1}{3}} \cdot 0,026}{0,91} = 28,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad 8.12$$

Kde  $Pr$  [–] a  $v$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] byly doplněny dle normy ČSN 73-0540-3 zpětnou iterací a odpovídají vzduchu o teplotě 32 °C.

Dále bylo potřebné určit hodnotu měrné tepelné entalpie  $h$  [ $kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ], aby bylo možné určit teplotu mokrého teploměru  $t_w$  [°C] z  $h - x$  diagramu:

$$h = 1,01 \cdot t_A \cdot x \cdot (2500 + 1,84 \cdot t_A) \quad 8.13$$

$$h = 1,01 \cdot 31,45 \cdot 0,0061 \cdot (2500 + 1,84 \cdot 31,45) = 47,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad 8.14$$

Měrná vlhkost  $x$  [ $kg \cdot kg_{s.v.}^{-1}$ ] byla odvozena z okolního vzduchu  $t_o = 20$  °C a  $\varphi_o = 40$  %. Z hodnoty vypočítané měrné tepelné entalpie, byla v  $h - x$  diagramu vyhledána teplota mokrého teploměru  $t_w = 17$  °C.

Výpočet koeficientu molekulární difuze systému vzduch – vodní pára  $D_{AB}$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]:

$$D = 2,193 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{P} \cdot \left( \frac{T_A}{273,15} \right)^{1,8} \quad 8.15$$

$$D_{AB} = 2,193 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{99300} \cdot \left(\frac{305,15}{273,15}\right)^{1,8} = 2,69 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad 8.16$$

Následně bylo možné spočítat Schmidtovo kritérium  $Sc$  [–] dle vztahu:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \Rightarrow \frac{1,63 \cdot 10^{-5}}{2,69 \cdot 10^{-11}} = 603452,2 \quad 8.17$$

Následoval výpočet Sherwoodova kritéria  $Sh$  [–] dle vztahu:

$$Sh = 0,664 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \Rightarrow 0,664 \cdot 193594,2^{0,8} \cdot 603452,2^{\frac{1}{3}} = 3,68 \cdot 10^{11} \quad 8.18$$

V této fázi již bylo možné vyjádřit a spočítat koeficient přestupu hmoty  $k_x$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]:

$$k_x = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{l} \Rightarrow \frac{3,68 \cdot 10^{11} \cdot 2,69 \cdot 10^{-11}}{0,91} = 0,65 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad 8.19$$

Vypočítat hustotu vlhkostního toku  $\Phi$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ] již bylo triviální:

$$\Phi = k_x \cdot (X_{Ae} - x_A) \Rightarrow 0,65 \cdot (0,042 - 0,0061) = 0,0235 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad 8.20$$

Kde  $X_{Ae}$  [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1}$ ] reprezentuje množství vlhkosti obsažené v sušeném jádře a  $x_A$  [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1}$ ] reprezentuje množství vlhkosti obsažené v sušicím vzduchu.

$$\Phi = 0,0235 \cdot 3600 = 84,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \quad 8.21$$

Z výsledku vyplývá, že při plném výkonu otopů a ventilace bude za jednu hodinu sušicího procesu odvedeno 84,5 kg vlhkosti ze sušené vsádky.

## 9 OPTIMALIZACE SUŠÍHO PROCESU

Pro zjištění optimálního nastavení výkonu sušárny byly sestaveny tabulky, které reprezentovaly parametry sušicího procesu pro určité procentuální výkony otopů. Výkon otopů byl postupně snižován vždy o 20 %. Do výše zmíněných tabulek byly dosazovány výkony ventilace  $P_v$  [W] od 100 % do 10 %, vždy s poklesem výkonu o 10 %. Bylo sledováno množství odvedené vlhkosti za hodinu v závislosti na množství spotřebované energie. Optimální nastavení sušárny bylo takové, které dokázalo odvézt minimálně 43,2 kg vlhkosti za hodinu při spotřebě co nejmenšího množství energie.

Parametry sušicího procesu při 100 % výkonu otopů:

Hodnoty při výkonu otopů 80 kW							
$P_v$ [%]	$u$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$Re$ [–]	$t_A$ [°C]	$\alpha_k$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	$k_x$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	$\Phi$ [ $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ]	$P$ [kW]
100	3,472	193594,204	31,450	28,929	0,654	84,505	93
90	3,125	173233,801	32,764	26,567	0,602	77,761	91,7
80	2,778	152236,399	34,455	24,136	0,549	70,924	90,4
70	2,431	132454,540	36,572	21,791	0,494	63,807	89,1
60	2,083	111024,342	39,581	19,535	0,438	56,643	87,8
50	1,736	89982,586	43,879	16,312	0,381	49,218	86,5
40	1,389	70495,591	50,313	13,957	0,319	41,256	85,2
30	1,042	50149,530	61,677	10,880	0,256	33,103	83,9
20	0,694	28761,557	88,113	7,506	0,191	24,629	82,6
10	0,347	9805,076	188,184	3,690	0,118	15,201	81,3

Tabulka 4 Parametry sušicího procesu při 100 % výkonu otopů

Parametry sušicího procesu při 80 % výkonu otopů:

Hodnoty při výkonu otopů 64 kW							
$P_v$ [%]	$u$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$Re$ [-]	$t_A$ [°C]	$\alpha_k$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	$k_x$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	$\Phi$ [ $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ]	$P$ [kW]
100	3,472	196984,645	29,069	29,118	0,651	84,223	77
90	3,125	176271,857	30,111	26,742	0,599	77,499	75,7
80	2,778	154875,363	31,450	24,200	0,547	70,690	74,4
70	2,431	133967,754	33,172	21,710	0,493	63,669	73,1
60	2,083	114177,300	35,419	19,174	0,436	56,343	71,8
50	1,736	92520,285	38,798	16,884	0,379	48,956	70,5
40	1,389	71986,069	43,879	13,645	0,318	41,172	69,2
30	1,042	52871,693	52,334	11,088	0,254	32,774	67,9
20	0,694	31731,894	71,520	7,745	0,187	24,177	66,6
10	0,347	11296,236	143,880	3,755	0,115	14,887	65,3

*Tabulka 5 Parametry sušicího procesu při 80 % výkonu otopů*

Parametry sušicího procesu při 60 % výkonu otopů:

Hodnoty při výkonu otopů 48 kW							
$P_v$ [%]	$u$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$Re$ [-]	$t_A$ [°C]	$\alpha_k$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	$k_x$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	$\Phi$ [ $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ]	$P$ [kW]
100	3,472	200444,915	26,733	29,308	0,649	83,944	61
90	3,125	179350,257	27,506	26,915	0,598	77,245	59,7
80	2,778	158499,774	28,473	24,378	0,544	70,376	58,4
70	2,431	137100,333	29,750	21,872	0,488	63,025	57,1
60	2,083	116831,601	31,412	19,242	0,431	55,770	55,8
50	1,736	96241,001	33,785	16,601	0,376	48,590	54,5
40	1,389	74842,930	37,511	14,053	0,316	40,866	53,2
30	1,042	55512,171	43,497	11,220	0,252	32,533	51,9
20	0,694	33433,020	57,509	7,866	0,185	23,933	50,6
10	0,347	13493,533	101,654	4,185	0,111	14,391	49,3

*Tabulka 6 Parametry sušicího procesu při 60 % výkonu otopů*

Parametry sušicího procesu při 40 % výkonu otopů:

Hodnoty při výkonu otopů 32 kW							
$P_v$ [%]	$u$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$Re$ [-]	$t_A$ [°C]	$\alpha_k$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	$k_x$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	$\Phi$ [ $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ]	$P$ [kW]
100	3,472	201625,513	24,473	29,450	0,649	83,849	45
90	3,125	179350,257	24,987	26,814	0,594	76,799	43,7
80	2,778	159422,451	25,630	24,495	0,544	70,299	42,4
70	2,431	137889,252	26,456	21,808	0,487	62,955	41,1
60	2,083	117514,571	27,557	19,262	0,431	55,713	39,8
50	1,736	97359,667	29,100	16,632	0,373	48,201	38,5
40	1,389	77437,682	31,412	13,847	0,312	40,367	37,2
30	1,042	57088,650	35,419	11,013	0,250	32,361	35,9
20	0,694	35993,034	43,879	7,837	0,183	23,647	34,6
10	0,347	15865,947	71,520	4,448	0,107	13,886	33,3

Tabulka 7 Parametry sušicího procesu při 40 % výkonu otopů

Parametry sušicího procesu při 20 % výkonu otopů:

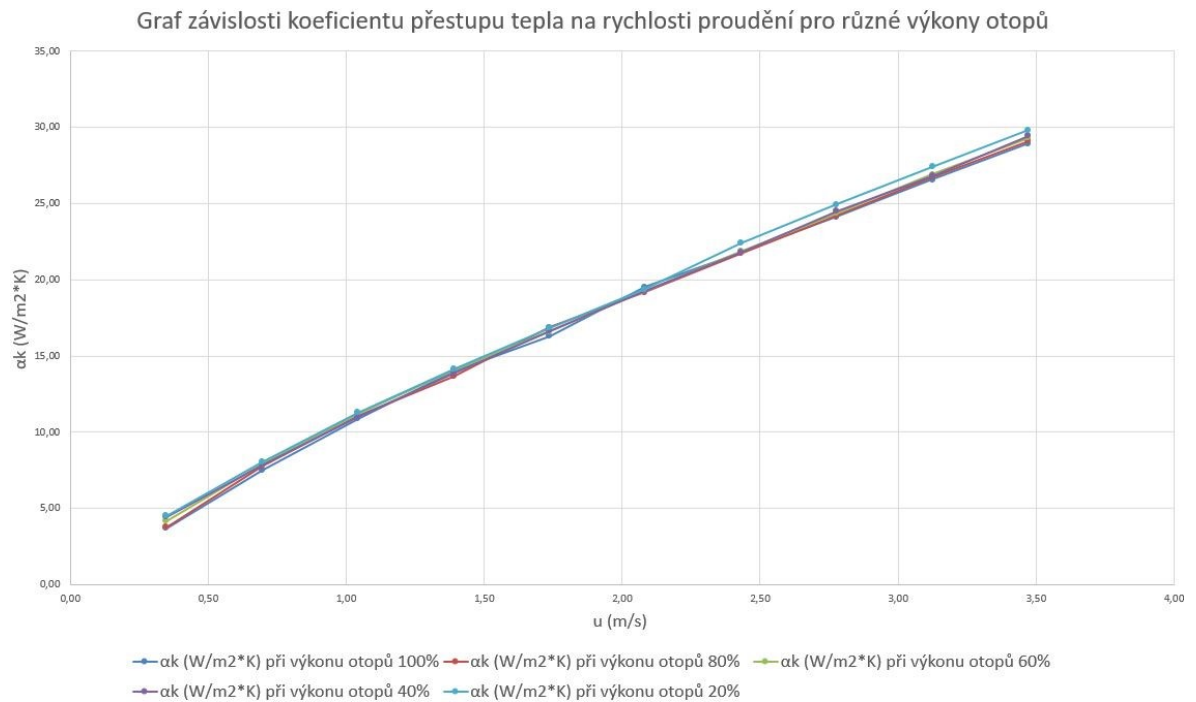
Hodnoty při výkonu otopů 16 kW							
$P_v$ [%]	$u$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$Re$ [-]	$t_A$ [°C]	$\alpha_k$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	$k_x$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	$\Phi$ [ $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ]	$P$ [kW]
100	3,472	207743,437	22,199	29,826	0,645	83,363	29
90	3,125	186969,094	22,444	27,415	0,593	76,625	27,7
80	2,778	166194,750	22,749	24,950	0,539	69,734	26,4
70	2,431	145420,406	23,142	22,422	0,485	62,669	25,1
60	2,083	119566,838	23,728	19,388	0,427	55,202	23,8
50	1,736	100222,458	24,473	16,835	0,371	47,933	22,5
40	1,389	80650,205	25,591	14,149	0,312	40,285	21,2
30	1,042	60487,654	27,506	11,282	0,248	32,003	19,9
20	0,694	39171,524	31,375	8,028	0,180	23,266	18,6
10	0,347	17996,517	43,879	4,501	0,105	13,582	17,3

Tabulka 8 Parametry sušicího procesu při 20 % výkonu otopů

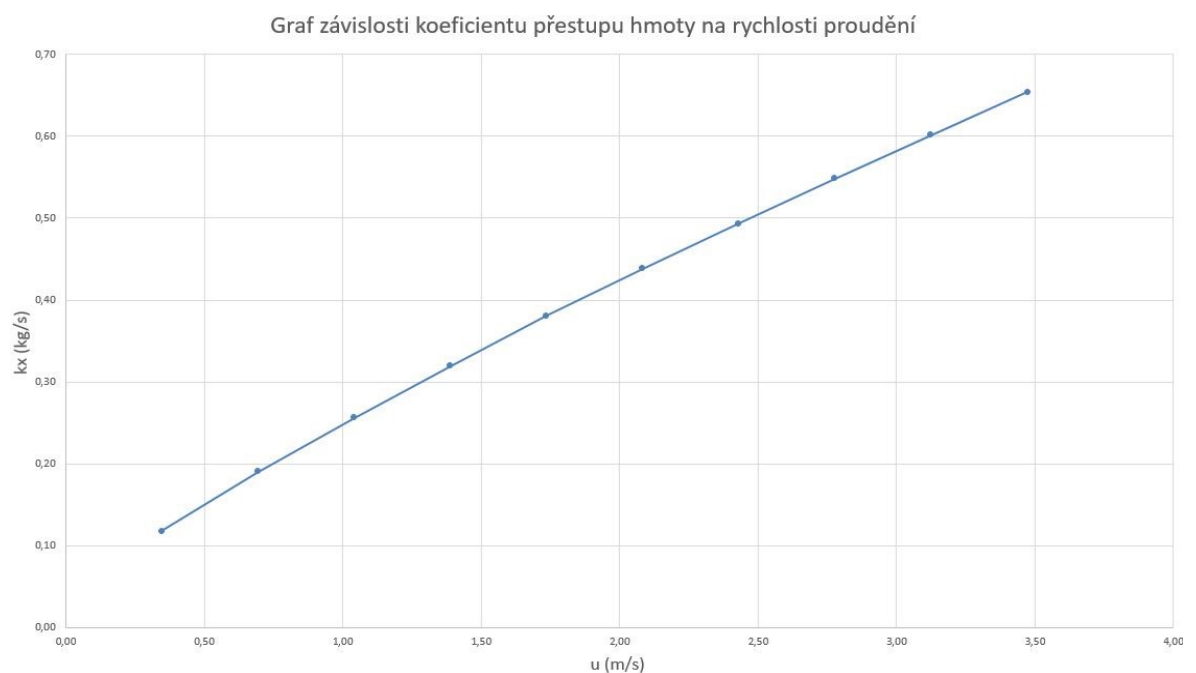


## 9.1 Sumarizace optimalizačních parametrů

Ze získaných dat bylo možné sestavit graf závislosti koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění vzduchu pro počítané výkony otopů a graf závislosti koeficientu přestupu hmoty na rychlosti proudění vzduchu.



Obrázek 46 Graf závislosti koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění pro různé výkony otopů



Obrázek 47 Graf závislosti koeficientu přestupu hmoty na rychlosti proudění

Z vypočítaných hodnot a výše uvedených grafů jasně vyplývá, že dominantním faktorem v sušicím procesu je rychlost proudění sušicího média. Je patrné, že čím rychleji bude sušicí vzduch proudit, tím bude růst intenzita koeficientu přestupu hmoty. Vliv dodaného tepla do systému je marginální v porovnání s vlivem rychlosti proudění a slouží pouze k vytvoření teplotního spádu, který je pro sušicí proces nezbytný. Z energetického hlediska je tomu přesně naopak. Příkon ventilátorů je výrazně menší než příkon otopů, proto se nákladově vyplatí využívat rychlosti proudění.

Na základě vypočítaných hodnot je optimální provozovat sušárnu při 20 % výkonu otopů a 50 % výkonů ventilátorů. Při takto nastavených parametrech bude odvedeno  $47,93 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  vlhkosti z jader, což přesahuje minimální požadované množství odvedené vlhkosti, stanovené na základě taktů vstřelovacích strojů. Energetická spotřeba takto nastavené sušárny bude 26 kWh se zahrnutím příkonu pohonu řetězového dopravníku.

Bylo zjištěno, že nejefektivnější nastavení sušárny pracuje s teplotou tak nízkou, že se nevyplatí vzduch recyklovat zpět do oběhu. Tato skutečnost si vyžádá drobnou úpravu konstrukce. Na cirkulační větve bude nezbytné vložit bypass s klapkou. Dle charakteru vsádky následně bude možné volit pracovní režim s vratkou vzduchu do systému, nebo s přímým odvodem vzduchu do výrobní haly.

## 10 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Náklady na výrobu navrhované sušárny zahrnující náklady na potřebný materiál a montáž byly vykalkulovány na 3 600 000 Kč. Burzovní ceny energií použité ve výpočtu, jsou vztaheny k červnu 2022. Dále bylo kalkulováno s nepřetržitým provozem jaderny se zahrnutím bezpečnostních přestávek.

Výrobní náklady stávajících sušáren		
Počet vyrobených jader	96	$ks \cdot h^{-1}$
Spotřeba zemního plynu	6,440	$m^3 \cdot h^{-1}$
Přepočet ekvivalentního výkonu	67,600	$kW \cdot h^{-1}$
Cena zemního plynu	2,367	$Kč \cdot kW$
Spotřeba energie na jádro	0,704	$kW \cdot ks^{-1}$
Náklady na vysušení jádra	1,667	$Kč \cdot ks^{-1}$

*Tabulka 9 Výrobní náklady stávajících sušáren*

Výrobní náklady stávajících sušáren		
Počet vyrobených jader	288	$ks \cdot h^{-1}$
Spotřeba elektrické energie	26,000	$kW \cdot h^{-1}$
Cena elektrické energie	5,115	$Kč \cdot kW$
Spotřeba elektrické energie na jádro	0,090	$kW \cdot ks^{-1}$
Náklady na vysušení jádra	0,461	$Kč \cdot ks^{-1}$

*Tabulka 10 Výrobní náklady navrhované sušárny*

Následný výpočet vyčísluje úsporu výrobních nákladů za rok provozu při 252 pracovních dní v roce:

$$(252 \cdot 21 \cdot 288) \cdot (1,667 - 0,398) = 1\,836\,882 \text{ Kč}$$

Implementací navrhované sušárny bude ušetřeno na výrobních nákladech 1 836 882 Kč ročně. Dá se tedy počítat s návratností investice v horizontu dvou let.

## 11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě parametrů navrhované sušárny a parametrů vsádky, byla vypočítána hustota vlhkostního toku, která reprezentuje množství odvedené vlhkosti z vsádky. Byly navrženy jednotlivé hodnoty výkonů otopů a ventilace, které byly následně propočítány dle uvedených vztahů uvedených v kapitole 8.2.

Na základě vypočítaných hodnot bylo stanovené optimální nastavení navrhované sušárny. Výsledky jasně deklarují, že dominantním faktorem v sušicím procesu je rychlost proudění sušicího média, zatímco vliv tepla dodaného do systému je marginální. Toto zjištění se velice příznivě projevilo na výrobních nákladech. Navrhovaná konstrukce si vyžádá drobnou modifikaci, která patrně zvýší náklady na výrobu zařízení, ale s porovnáním úspor na výrobních nákladech, bude tato suma jistě marginální. Při nastavených parametrech sušárny s 20 % výkonem otopů a 50 % výkonem ventilace, budou náklady na vysušení jednoho kusu jádra 0,461 Kč. Náklady na vysušení jednoho kusu jádra při používání stávajících sušáren jsou 1,667 Kč. Pokles výrobních nákladů je tak enormní, že se investice do navrhované sušárny vlivem poklesu výrobních nákladů vrátí v horizontu dvou let.

Dále bylo prokázáno, že navrhovaná sušárna dokáže odvézt požadované množství vlhkosti, stanovené na základě taktů vstřelovacích strojů. Po implementaci navrhované sušárny do provozu, bude možné přejít na používání vodou ředitelných nátěrových hmot, čímž se zvýší bezpečnost práce, šetrnost výrobního procesu vzhledem k životnímu prostředí a v neposlední řadě dojde k podružným poklesům výrobních nákladů vlivem odstranění spotřeby lihu.

Posledním argumentem pro implementaci navrhované sušárny, který rezonuje zvláště v dnešní době, je nepředvídatelná situace v oblasti dodávek zemního plynu do Evropy. Redukcí spotřeby zemního plynu můžeme předejít potenciálním problémům s dodávkami. Proto se v této souvislosti zdá elektrická energie jako pragmatičtější volba.

## ZÁVĚR

V rešeršní části byla popsána technologie výroby jader a její funkce ve slévárně jako výrobním celku. Následně byly popsány různé žáruvzdorné nátěrové hmoty a kvalitativní požadavky na jádra opatřené nátěry v souvislosti s jakostí povrchu výsledných produktů. Dále byla fyzikálně popsána problematika sušení a byla tak stanovena metodika výpočtů. V samotném závěru byly popsány vybrané konstrukce konvektivních sušáren.

Na základě stanovených cílů bylo nezbytné vytvořit konstrukční návrh nové sušárny, která by umožnila přechod z lihových žáruvzdorných nátěrů na vodou ředitelné nátěry. Byla popsána technologie a výroba jader ve výrobním závodě Slévárny Kuřim. Bylo provedeno měření úbytku vlhkosti ze zkušebních vzorků za použití stávajících komorových sušáren. Z naměřených dat byla následně sestavena sušicí křivka, která popisuje samotný sušicí proces. Na základě prodloužení času potřebného k sušení vodních nátěrů, byly stanoveny minimální kapacitní nároky na nové zařízení. Vzhledem k charakteru výroby byla navržena nová konstrukce typu páternoster, jejíž jednotlivé konstrukční části byly popsány. Následoval výpočet hmotnostního úbytku vlhkosti za jednotku času pro určité výkony otopů a ventilátorů. Vypočítané hodnoty posloužily jako podklady k optimalizaci, z které jasně vyplynulo, že nejefektivnější nastavení sušárny je takové, které využívá vysoké rychlosti proudu vzduchu. Následoval výpočet výrobních nákladů při provozu navrhované sušárny kontra stávajících sušáren. Z výpočtu bylo patrné, že provozování navrhované konstrukce je hospodárnější a její implementace do výrobního závodu má smysl.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHNA, Štefan a Iva NOVÁ. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008, 326 s. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [2] RAMEGOWDA, Manu. *Development of water-based core technology for light alloys* [online]. University of Teesside, August 2008 [cit.2022-01-27]. Dostupné z: <https://research.tees.ac.uk/ws/portalfiles/portal/8012965/112685.pdf>. [Online]
- [3] JELÍNEK, Petr. *Slévárství 4*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2000. str. 256. 80-7078-952-2.
- [4] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita. ISBN 80-7043-491-0.
- [5] VEVERKA, Jiří. *Vodou rozpustná slévárenská pojiva vytvrzovaná dehydratací*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. PETR CUPÁK, Ph.D.
- [6] ROUSÍN, Karel. *Slévárenské formovací materiály*: celost. vysokošk. učebnice pro skupinu studujících oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba. Praha: SNTL. ISBN 8003002788.
- [7] OSTREZI, Filip. *Ostřiva slévárenských formovacích a jádrových směsí*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. PETR CUPÁK, Ph.D.
- [8] HLAVSA, Petr. *Formovací materiály*: mezinárodní konference, 12. ročník: 19. a 20.4.2011, Hotel Devět Skal, Českomoravská vrchovina, Milovy. Brno: Česká slévárenská společnost, 2011. ISBN 978-80-02-02316-6.
- [9] ROUSÍN, Karel. *Formovací materiály a snižování nákladů na odlitek*: mezinárodní konference, 8. ročník: 20.4.2005. Brno ISBN 80-02-01725-0.
- [10] HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0293-8.
- [11] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Brno: akademické nakladatelství.
- [12] BARTOŠ, Filip. *Technologie zhotovení odlitku Na hotovo*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. MILAN HORÁČEK, Ph. D.
- [13] JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi II. část – Pojivové soustavy formovacích směsí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1996, 177 s. ISBN 80-7078-326-5.

- [14] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook*. Birmingham: Elsevier Science & Technology, 2015. 9780444635099.
- [15] ELBEL, T. *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992.
- [16] STEFANESCU, D.M. *Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I: Physics of Penetration Defects and Penetration Model*. AFS Transaction, vol. 104, 1996, 96-206, s.1233-1248.
- [17] TOMEK, Ladislav, STACHOVEC Ivo a TOMKOVÁ Jana. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků* [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z:<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-s>.
- [18] ROWLEY, T.M. *Atlas of casting defects*. International Committee of Foundry Technical Association. 2.vydání 2003, ISBN 0-87433-053-X.
- [19] SIDDY, P. *The changing face of refractory coatings in India*. 68. SSK Chennai, Indie.
- [20] BROWN, J.R. *Foseco ferrous foundryman's handbook*. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 9780750642842.
- [21] MÍKA, Vladimír a NEUŽIL Lubomír. *Chemické inženýrství II. 2.*, přeprac. vyd. Praha: VŠCHT, 1999. ISBN 80-7080-359-2.
- [22] NEUŽIL, Lubomír a MÍKA, Vladimír. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., upr. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1998. ISBN 80-7080-312-6.
- [23] Kolomazník, K. *Teorie technologických procesů III*, VUT Brno, FT Zlín, 1978.
- [24] JANÁČOVÁ, Dagmar. *Podklady k přednáškám: Sušení*. Zlín : UTB, 2020.
- [25] CHYSKÝ, Jaroslav. *Vlhký vzduch 2.*, upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1977. Řada strojírenské literatury.
- [26] SMITH, J.M. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. Eighth edition. Nwe York, NY: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 9781259696527.
- [27] *Vlhký vzduch a Molliérův diagram* [online]. České vysoké učení technické v Praze - fakulta stavební [cit. 2022-02-18]. Dostupné z:  
[http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/14/eeb2/du3\\_vlhky-vzduch-a-mollieruv-diagram.pdf](http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/14/eeb2/du3_vlhky-vzduch-a-mollieruv-diagram.pdf)
- [28] VOJKŮVKOVÁ, Petra. *Vybrané jevy při přenosu tepla vzduchotechnikou*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.
- [29] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. 3. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0003-9.

- [30] DELGADO, J.M.P.Q., BARBOSA DE LIMA, A.G. *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. Switzerland : Springer International Publishing AG, 2014. 9783319040530.
- [31] JUNEK, Jan. *Konstrukční návrh průmyslové sušárny*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. TOMÁŠ NOVOTNÝ.
- [32] WALAS, S.M. *Chemical Process Equipment - Selection and Design*. Boston : Butterworths, 1988. 9780750671347.
- [33] HASAL, Pavel, SCHREIBER, Igor a ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [34] MORES, Antonín a NĚMEC, Milan. *Technologická zařízení sléváren*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 9788001044902.
- [35] Land, C. M. *Drying in the Process Industry*. Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons Ltd, 2012. 9780470131176.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka:	Jednotka:	Popis:
$A$	$m^2$	Plocha fázového rozhraní
$a$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel teplotní vodivosti
$c_p$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
$D_{AB}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Koeficient molekulární difuze složky A do složky B
$h$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Měrná entalpie
$h'_e$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní měrná entalpie sušeného materiálu na vstupu
$h_i$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní měrná entalpie vzduchu ohřátého kaloriferem
$h'_i$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní měrná entalpie sušeného materiálu na výstupu
$h_m$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní měrná tepelná entalpie recyklovaného vzduchu
$h_o$	$kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní měrná entalpie sušícího vzduchu před ohřevem
$h_s$	$kWh \cdot m^{-3}$	Objemové spalné teplo
$k$	-	Přepočtový objemový koeficient
$k_p$	$s \cdot m^{-1}$	Koeficient přestupu vlhkosti vztážený k rozdílům tlaků
$k_x$	$kg \cdot s^{-1}$	Koeficient přestupu vlhkosti vztážený k rozdílům měrné vlhk.
$l$	$m$	Charakteristický délkový rozměr
$Le$	-	Lewiosovo číslo
$m$	$kg$	Hmotnost
$M_m$	$kg \cdot mol^{-1}$	Molární hmotnost
$m_p$	$g$	Hmotnost vodní páry
$m_{s.v.}$	$kg_{s.v.}$	Hmotnost suchého vzduchu
$\dot{m}_A$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní tok vlhkosti
$\dot{m}_B$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní tok sušícího vzduchu
$\dot{m}'_B$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní tok recyklovaného vzduchu
$\dot{m}_c$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní tok sušeného materiálu
$\dot{m}_{chv}$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok ochlazovaného vzduchu
$\dot{m}_{ov}$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok ohřivaného vzduchu
$\dot{m}_w$	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok zkondenzované vody
$n$	$mol$	Látkové množství
$Nu$	-	Nusseltovo kritérium
$O$	$m$	Smáčený obvod
$p$	$MPa$	Tlak
$p_A$	$MPa$	Tlak vlhkých par v obklopujícím prostředí
$p''_{AW}$	$MPa$	Parciální tlak vlhkých par v mezní vrstvě
$p_p$	$MPa$	Parciální tlak vlhkých par
$p_p''$	$MPa$	Parciální tlak sytých vlhkých par
$P$	$W$	Výkon otopů
$Pr$	-	Prandtlovo číslo
$q$	$W \cdot m^{-2}$	Hustota tepelného toku
$\dot{Q}_k$	$W$	Tepelný příkon kaloriferu
$\dot{Q}_{ch}$	$W$	Výkon chlazení
$\dot{Q}_0$	$W$	Dodatečný tepelný příkon
$\dot{Q}_{oh}$	$W$	Výkon ohřevu
$\dot{Q}_z$	$W$	Tepelné ztráty způsobené nedokonalou tepelnou izolací

$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$R_m$	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Molární plynová konstanta
$S$	$m^2$	Plocha sušící komory
$S_p$	$m^2$	Plocha překážek
$S_s$	$m^2$	Plocha skutečná
$Sc$	-	Schmidtovo číslo
$Sh$	-	Sherwoodovo číslo
$t$	$^{\circ}C$	Termodynamická teplota
$t_A$	$^{\circ}C$	Teplota sušícího vzduchu
$t_{Aw}$	$^{\circ}C$	Teplota na fázovém rozhraní
$t_o$	$^{\circ}C$	Teplota okolí
$t_w$	$^{\circ}C$	Teplota vlhkého teploměru
$t_p$	$^{\circ}C$	Teplota počáteční
$t_r$	$^{\circ}C$	Teplota rosného bodu
$T_A$	$K$	Termodynamická teplota sušícího vzduchu
$V$	$m^3$	Objem
$\nu$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita
$u$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost proudění
$U_A$	-	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti sušícího vzduchu
$U_{Aw}$	-	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti na fázovém rozhraní
$x$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Měrná vlhkost
$X_{Ae}$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti materiálu na vstupu
$X_{Ai}$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti materiálu na výstupu
$x_A$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti sušícího vzduchu
$x_{Ae}$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti vzduchu na výstupu
$x_{Ai}$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti vzduchu na vstupu
$x_{Aw}$	$g \cdot kg_{s.v.}^{-1}$	Relativní hmotnostní zlomek vlhkosti na fázovém rozhraní
$\alpha_k$	$W \cdot m^{-2} \cdot K$	Koeficient přestupu tepla
$\varepsilon$	-	Emisivita
$\eta$	$N \cdot s \cdot m^{-2}$	Dynamická viskozita
$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
$\Phi$	$kg \cdot m^{-2}$	Hustota vlhkostního toku
$\varphi$	-	Relativní vlhkost

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Pravé a nepravé jádro .....</i>	13
<i>Obrázek 2 Tvar a povrch zrn ostřiva .....</i>	15
<i>Obrázek 3 Metody výroby jader.....</i>	16
<i>Obrázek 4 princip metody Croning .....</i>	17
<i>Obrázek 5 Metoda Cold-Box .....</i>	18
<i>Obrázek 6 Oxidační procesy ve formě a její důsledky.....</i>	20
<i>Obrázek 7 Schéma řezu lícni vrstvou jádra .....</i>	24
<i>Obrázek 8 Tok vlhkosti difúzí.....</i>	27
<i>Obrázek 9 Sušicí křivka .....</i>	28
<i>Obrázek 10 Mollierův graf .....</i>	33
<i>Obrázek 11 Ohřev vzduchu.....</i>	34
<i>Obrázek 12 Procesy chlazení vzduchu.....</i>	35
<i>Obrázek 13 Procesy vlhčení vzduchu .....</i>	36
<i>Obrázek 14 Schéma kontinuální ideální sušárny.....</i>	41
<i>Obrázek 15 Schéma kontinuální ideální sušárny s recyklem.....</i>	42
<i>Obrázek 16 Podíl zastoupení sušáren v průmyslové výrobě dle předávání energie .....</i>	44
<i>Obrázek 17 Schéma komorové sušárny .....</i>	46
<i>Obrázek 18 Schéma tunelové sušárny .....</i>	47
<i>Obrázek 19 Kondenzační sušárna .....</i>	48
<i>Obrázek 20 Páternosterová sušárna.....</i>	49
<i>Obrázek 21 Schéma bubnové sušárny .....</i>	50
<i>Obrázek 22 Schéma proudové sušárny .....</i>	51
<i>Obrázek 23 Schéma fluidní sušárny.....</i>	52
<i>Obrázek 24 Schéma rozprašovací sušárny .....</i>	53
<i>Obrázek 25 Stávající komorová sušárna .....</i>	56
<i>Obrázek 26 Layout strojní jaderny .....</i>	57
<i>Obrázek 27 Stávající sušárna .....</i>	58
<i>Obrázek 28 Zkušební jádro.....</i>	59
<i>Obrázek 29 Laboratorní sušička.....</i>	59
<i>Obrázek 30 Měření viskozity Fordovým pohárkem .....</i>	60
<i>Obrázek 31 Vzorokly v sušicí komoře .....</i>	62
<i>Obrázek 32 Sušicí křivka vodních nátěrů .....</i>	62
<i>Obrázek 33 Vizualní úbytek vlhkosti.....</i>	63
<i>Obrázek 34 Teplota povrchu zkušebních vzorků .....</i>	63

<i>Obrázek 35 Hloubka penetrace .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 36 Měření podílu vlhkosti na váze Precisa HA60 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 37 Sušicí křivka lihových nátěrů .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 38 Jádru brzdového kotouče .....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 39 Navržená sušárna konstrukce páternoster .....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 40 Řetězový dopravník .....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 41 Pohonná jednotka.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 42 Napínací člen.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 43 Paleta s jádry .....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 44 Aretační mechanismus.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 45 Řez sušárnou .....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 46 Graf závislosti koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění .....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 47 Graf závislosti koeficientu přestupu hmoty na rychlosti proudění.....</i>	<i>81</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Žáruvzdorná plniva .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 2 Měření hmotnostního úbytku v průběhu sušení vodních nátěrů .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 3 Měření hmotnostního úbytku v průběhu sušení lihových nátěrů .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 4 Parametry sušicího procesu při 100 % výkonu otopů .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 5 Parametry sušicího procesu při 80 % výkonu otopů .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 6 Parametry sušicího procesu při 60 % výkonu otopů .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 7 Parametry sušicího procesu při 40 % výkonu otopů .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 8 Parametry sušicího procesu při 20 % výkonu otopů .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 9 Výrobní náklady stávajících sušáren .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 10 Výrobní náklady navrhované sušárny .....</i>	<i>83</i>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha P I: Kalibrační protokol sušící váhy Precisa HA60.

Příloha P II: Kalibrační protokol váhy Precisa 1620 C.

Příloha P III: Technický list lihového žáruvzdorného nátěru.

Příloha P IV: Technický list vodního žáruvzdorného nátěru.

Příloha P V: Výkres sestavy.

Příloha PVI: Výpočet optimalizace (elektronická).