

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**TOMÁŠ
LOSA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Losa** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **502345**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh sušky pro odpadní biomasu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a dryer for waste biomass

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte sušku pro přípravu biomasy s vysokým obsahem vody před jejím dalším energetickým využitím.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše vhodných typů sušek pro biomasu a popis procesu sušení.
2. Vzájemné srovnání vybraných typů sušek.
3. Výpočet hmotnostní a energetické bilance sušení.
4. Návrh sušky pro zadané parametry provozu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Havlík, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Jan Havlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Návrh sušky pro odpadní biomasu* samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Jana Havlíka, Ph.D. a za pomoci literatury a zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Tomáš Losa

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš Losa
Název BP/DP:	Návrh sušky pro odpadní biomasu
Anglický název:	Design of a dryer for waste biomass
Akademický rok:	2022/2023
Ústav/Odbor	Ústav energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP/DP:	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 55 Počet obrázků: 33 Počet tabulek: 9 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Biomasa, sušení, návrh sušárny, dřevní štěrka, konvektivní sušení
Keywords:	Biomass, drying, dryer design, wood chips, convective drying
Anotace:	Tato práce se zabývá popisem způsobů sušení, v další části je podrobná rešerše využívaných sušáren, využití sušáren v různých průmyslových odvětvích a v závěrečné části je zhotoven bilanční výpočet pro konvektivní a konduktivní typ sušárny a jejich následný rozměrový návrh a schéma.
Abstract:	This work deals with the description of drying methods, in the upcoming part there is a detailed research of used dryers, their use in different industrial branches and the final part of thesis deals with balance calculation for convective and conductive types of dryers and their dimensional design and schema.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za trpělivost, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této závěrečné práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Sušení	10
2.1	Sušící prostředí	11
2.2	Statika sušení	12
2.3	Kinetika sušení	13
2.4	Způsoby sušení	14
3	Sušárny	15
3.1	Klasifikace sušáren	15
3.2	Konvektivní sušárny	15
3.2.1	Komorové sušárny	15
3.2.2	Pásové sušárny	16
3.2.3	Rotační bubnové sušárny	17
3.2.4	Fluidní sušárny	17
3.2.5	Proudové sušárny	18
3.2.6	Rozprašovací sušárny	19
3.3	Konduktivní sušárny	19
3.3.1	Válcové sušárny	19
3.3.2	Rotační bubnové sušárny	20
3.3.3	Lopátkové sušárny	20
3.3.4	Sublimační (lyofilizační) sušárny	21
3.4	Radiační sušárny	22
3.4.1	Sušárny s infračerveným ohřevem	22
3.4.2	Sušárny s dielektrickým ohřevem	22
3.4.3	Mikrovlnné sušárny	23
3.5	Porovnání sušáren a výběr navrhované sušárny	24
3.6	Aplikace sušení v průmyslu	26
3.6.1	Sušení biomasy	26
3.6.2	Sušení v potravinářství	27
3.6.3	Sušení ve stavebním průmyslu	28
3.6.4	Sušení v automobilovém průmyslu	29

3.6.5	Sušení v chemickém průmyslu	30
3.6.6	Sušení v papírnictví.....	31
3.6.7	Sušení v textilním průmyslu	32
3.6.8	Shrnutí průmyslových aplikací.....	33
4	Vývoj sušáren	34
5	Návrh sušárny na odpadní biomasu.....	36
5.1	Hmotnostní bilance materiálu	37
5.2	Energetická bilance.....	37
5.2.1	Energetická bilance konvektivní sušárny.....	37
5.2.2	Energetická bilance konduktivní sušárny	42
5.3	Návrh konvektivní bubnové rotační sušárny.....	43
5.3.1	Návrh rozměrů konvektivní sušárny	43
5.3.2	Výpočet doplňujících parametrů konvektivní sušárny.....	43
5.4	Návrh konduktivní bubnové rotační sušárny	44
5.4.1	Návrh rozměrů konduktivní sušárny	44
5.4.2	Výpočet doplňujících parametrů konduktivní sušárny	45
5.5	Technologický návrh	45
5.5.1	Konvektivní	45
5.5.2	Konduktivní	46
5.6	Schémata sušáren	46
5.6.1	Konvektivní	47
5.6.2	Konduktivní	48
6	Závěr.....	49
7	Seznam zdrojů.....	50
8	Seznam obrázků.....	53
9	Seznam tabulek.....	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
c_p	Měrná tepelná kapacita sušiny	[kJ/kg.K]
c_{pw}	Měrná tepelná kapacita vody	[kJ/kg.K]
c_a	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	[kJ/kg.K]
c_v	Měrná tepelná kapacita vodní páry	[kJ/kg.K]
\dot{M}_A	Hmotnostní tok sušícího media	[kg/h]
\dot{M}_S	Hmotnostní tok sušeného materiálu	[kg/h]
M_{pv0}	Hmotnostní tok sušeného materiálu na vstupu	[kg/h]
M_{pv1}	Hmotnostní tok usušeného materiálu na výstupu	[kg/h]
M_{w0}	Hmotnostní tok vody v materiálu na vstupu	[kg/h]
M_{w1}	Hmotnostní tok vody v materiálu na výstupu	[kg/h]
M_{H_2O}	Molární hmotnost vody	[g/mol]
M_{vzduch}	Molární hmotnost vzduchu	[g/mol]
X_A	Měrná vlhkost	[kg _{vody} /kg _{vzduchu}]
X_{A0}	Počáteční měrná vlhkost sušeného materiálu	[kg _{vody} /kg _{vzduchu}]
X_{A1}	Konečná měrná vlhkost sušeného materiálu	[kg _{vody} /kg _{vzduchu}]
X_{S0}	Počáteční měrná vlhkost sušícího media	[kg _{vody} /kg _{vzduchu}]
X_{S1}	Počáteční měrná vlhkost sušícího media	[kg _{vody} /kg _{vzduchu}]
φ	Relativní vlhkost	[%]
φ_0	Relativní vlhkost vzduchu na vstupu	[%]
φ_1	Relativní vlhkost vzduchu na výstupu	[%]
W	Obsah vody materiálu	[%]
W_0	Obsah vody materiálu na vstupu	[%]
W_1	Obsah vody materiálu na výstupu	[%]
\dot{W}	Hmotnostní tok odsušené vody	[kg/h]
M_{pv0}	Hmotnostní tok sušeného materiálu na vstupu	[kg/h]
M_{pv1}	Hmotnostní tok usušeného materiálu na výstupu	[kg/h]
M_{w0}	Hmotnostní tok vody v materiálu na vstupu	[kg/h]
M_{w1}	Hmotnostní tok vody v materiálu na výstupu	[kg/h]
m_{in}	Množství materiálu v sušárně	[kg]
h	Měrná entalpie	[kJ/kg]
h_{A1}	Počáteční entalpie sušeného materiálu	[kJ/kg]
h_{A0}	Konečná entalpie sušeného materiálu	[kJ/kg]
h_{s1}	Počáteční entalpie sušícího media	[kJ/kg]
h_{s0}	Konečná entalpie sušícího media	[kJ/kg]
h_v	Měrná entalpie vody	[kJ/kg]
h_p	Měrná entalpie páry	[kJ/kg]

Symbol	Veličina	Jednotka
$h_{Aohř}$	Měrná entalpie ohřáté páry	[kJ/kg]
I	Měrné výparné teplo vody	[kJ/kg]
t_{s0}	Teplota materiálu na vstupu	[°C]
t_{s1}	Teplota materiálu na výstupu	[°C]
t_{A0}	Teplota vzduchu na vstupu	[°C]
t_{A1}	Teplota vzduchu na výstupu	[°C]
Δt	Rozdíl teplot	[°C]
$t_{Aohř}$	Teplota ohřátého vzduchu	[°C]
T_{dp}	Teplota rosného bodu	[°C]
T_{wb}	Teplota mokrého teploměru	[°C]
p	Tlak vzduchu	[Pa]
p_{A0}^o	Nasycený tlak vodních par na vstupu	[Pa]
p_{A1}^o	Nasycený tlak vodních par na výstupu	[Pa]
p_{wA0}	Parciální tlak vodních par na vstupu	[Pa]
p_{wA1}	Parciální tlak vodních par na výstupu	[Pa]
\dot{Q}	Tepelný výkon	[kW]
$\dot{Q}_{ohřev}$	Tepelný výkon využitý na ohřev sušárny	[kW]
$\dot{Q}_{výp}$	Tepelný výkon využitý pro vypaření vody	[kW]
\dot{Q}_{teor}	Teoretický potřebný tepelný výkon	[kW]
V	Objem	[m ³]
S	Teplosměnná plocha	[m ²]
L	Délka	[m]
d	Průměr	[m]
r	Poloměr	[m]
ρ_v	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
ρ_s	Hustota dřevní štěpky	[kg/m ³]
A_o	Měrná objemová odpařivost	[kg/m ³ .h]
A_p	Měrná plošná odpařivost	[kg/m ² .h]
τ	Čas zdržení materiálu v sušárně	[min]
v	Rychlost vzduchu v sušárně	[m/s]

1 Úvod

V posledních letech dochází ke zvětšování podílu obnovitelných zdrojů na výrobě tepla a elektřiny. Z celosvětového hlediska životního prostředí a ovzduší je využití obnovitelných zdrojů jako paliva velice důležité, už jen protože snižují poškození životního prostředí. Biomasa je jedním z nich. Biomasu jako takovou je možné vyprodukovat ve velice krátké době s porovnáním fosilních paliv, které vznikají díky změnám, co trvají miliony let. Tato práce se zabývá biomasou, konkrétně sušením odpadní dřevní štěpky, která se následně využívá jako palivo. Nejdůležitější vlastností dřevní štěpky je její vysoký obsah vody, která značně ovlivňuje kvalitu spalování. Pomocí sušení je možné snížit obsah vody, a tím zvýšit jak její výhřevnost, tak snížit její celkovou hmotnost. Dá se tak učinit pasivním sušením, což znamená na slunci, nebo se dá využít aktivního sušení, které je značně rychlejší. Pro využití aktivního sušení je třeba vybrat a navrhnout vyhovující typ sušárny pro volený materiál.

Hlavním cílem této práce je návrh sušárny pro odpadní biomasu, konkrétně dřevní štěpku, pro zadané parametry, s tím popis procesu sušení, rešerše vhodných typů sušárny, jejich vzájemné srovnání, výpočet hmotnostní a energetické bilance sušení a využití těchto výpočtů pro návrh základních rozměrů sušárny, její energetickou náročnost a technologické zpracování. Návrh je doplněn o schémata navržené sušárny.

2 Sušení

Sušení je proces, při kterém se přívodem tepla odstraňuje vlhkost, většinou ve formě vody, z daného materiálu mechanicky, vypařováním nebo sublimací bez toho, aby se měnilo jeho chemické složení. V energetickém průmyslu se sušení uplatňuje především pro zvýšení výhřevnosti, kvality a dosažení lepšího průběhu spalování určitého materiálu. Aktivní sušení je energeticky, tím pádem i ekonomicky náročný proces, který se využívá k dosažení určité hodnoty vlhkosti materiálu. U sušených materiálů se tedy dbá především na jejich obsahu vody a formě, kterou je voda vázána na materiál. Snížením obsahu vody např. u biomasy lze zvýšit její cenu, a tudíž i zisk. [1,5,9,10]

Obsah vody v materiálu určuje:

- **Měrná vlhkost:** X_A , která je dána poměrem $\frac{kg_{vody}}{kg_{sušiny}}$
- **Obsah vody:** W , který je dán poměrem $\frac{kg_{vody}}{kg_{vlhkého\ materiálu}}$

Forma, jakou je voda vázána na materiál lze rozdělit na:

- **Fyzikálně mechanické vazby** – Voda je vázaná na materiál adhezivními silami v pórech. Tyto vazby jsou nejslabší a není obtížné je odstranit sušením.
- **Fyzikálně chemické vazby** – Voda je vázaná adsorpčně a osmoticky.
- **Chemické vazby** – Vazby jsou již natolik silné, že je není možno odstranit sušením.

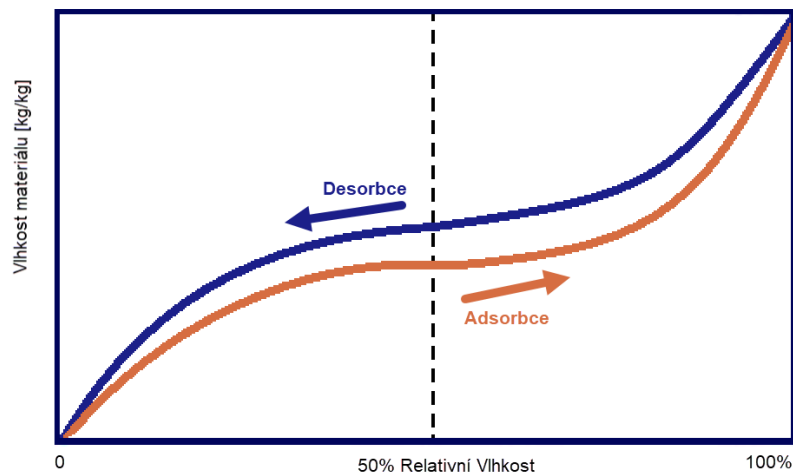
K sušení dochází v tu chvíli, kdy tenze par kapaliny zadržované tuhou fází je vyšší než tenze par kapaliny v okolním prostředí. V opačném případě materiál vlhne. Forma vazby vody také určuje, jak velkou energii je třeba vynaložit k odstranění vody z materiálu. Vzniklé vazební formy závisí na struktuře a měrné vlhkosti materiálu. Strukturu materiálu lze rozdělit dle velikosti pórů na:

- **Makroporézní** – rozměry kapilár jsou natolik velké, že gravitační síly jsou srovnatelné s kapilárními silami
- **Makrokapilární** – průměr kapilár jsou větší než 10^{-4} mm
- **Mikrokapilární** – průměr kapilár jsou menší než 10^{-4} mm

Síla vazeb se projevuje tím, že parciální tlak vodních par na povrchu materiálu je menší než tlak sytých vodních par odpovídající teplotě materiálu. U makroporézních materiálů platí, že se tyto tlaky rovnají. Poměr parciálního tlaku vodních par ku tlaku sytých vodních par se nazývá aktivita vody. Aktivita vody má význam především v potravinářství, a to u konzervace potravin. Snížením aktivity vody se dá podstatně omezit šíření mikroorganismů, konkrétně pod hodnoty 0,9 zamezuje tvorbě bakterií, pod 0,8 tvorbě kvasinek a pod 0,75 tvorbě plísní. Tudíž cílem sušení nemusí být především

pro dosažení určité vlhkosti, ale také zmenšení aktivity vody, či zmenšení hmotnosti a objemu výhodnou pro transport materiálů. [1,5,9,10]

Graf sorpční izotermy určuje vztah mezi měrnou vlhkostí materiálu a relativní vlhkostí vzduchu φ . Adsorbce znamená vlhnutí a desorbce sušení.



Obrázek 1 – Sorpční izoterma [4]

Z grafu je možné zjistit, jak moc lze materiál vysušit při konkrétní relativní vlhkosti φ sušícího prostředí. Z tvaru izotermy lze odhadnout množství vody vázané monomolekulární adsorpcí, polymolekulární adsorpcí nebo kapilárními silami a podíl volné vody. Sorpční izoterma také určuje průběh parciálního tlaku vodní páry na povrchu během všech fází sušení, pokud se zanedbá vnitřní difúzní odpor sušeného materiálu. Parciální tlak je klíčová veličina určující rychlost sušení. [1,10]

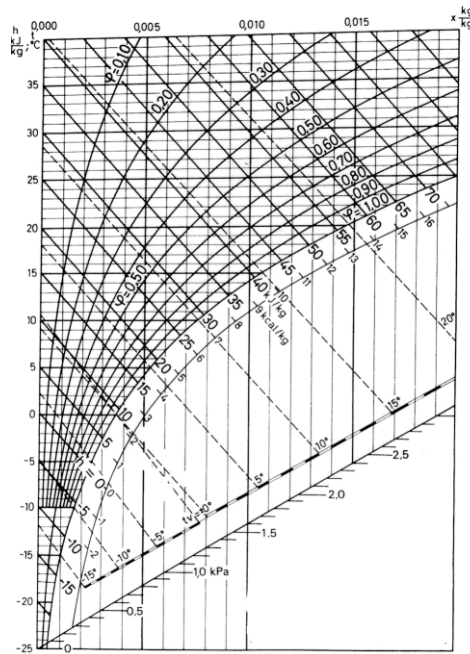
2.1 Sušící prostředí

Sušícím prostředím může být pára, inertní plyny, spaliny, ale nejčastěji je využíváno vlhkého vzduchu. Úkolem sušícího prostředí je přivádět teplo a následně odvádět vysušenou vlhkost. Parametry vlhkého vzduchu je možno odečíst z Mollierova h-X diagramu. [1,10]

Parametry vlhkého vzduchu:

- **Měrná vlhkost** – relativní hmotnostní podíl vodní páry a suchého vzduchu [kg/kg]
- **Relativní vlhkost** – φ – poměr hmotnostní koncentrace páry k maximální možné koncentraci páry v nasyceném vzduchu při konstantní teplotě.
- **Entalpie** – h – je vztažená k referenční teplotě 0 °C na 1 kg suchého vzduchu. Dá se vyjádřit součtem entalpie suchého vzduchu s entalpií vodní páry.
- **Teplota rosného bodu** – T_{dp} – teplota, při které začíná docházet ke kondenzaci páry. Úzce souvisí s nasycením vzduchu.

- **Teplota mokrého teploměru** – T_{wb} – Teplota materiálu při sušení volné vody, po vysušení volné vody se teplota materiálu zvyšuje.



Obrázek 2 – Mollierův h-X diagram [3]

2.2 Statika sušení

Statika sušení zahrnuje materiálové a tepelné bilance sušeného materiálu a sušícího media.

Látková bilance:

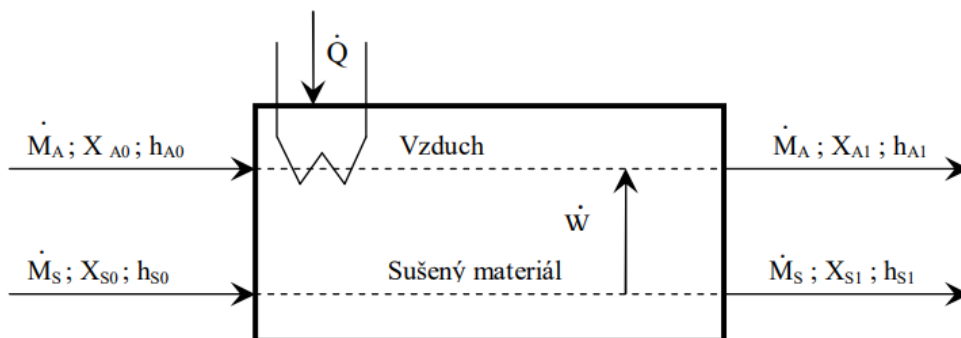
$$\dot{M}_A \cdot X_{A0} + \dot{M}_S \cdot X_{A0} = \dot{M}_A \cdot X_{A1} + \dot{M}_S \cdot X_{A1}$$

Hmotnostní bilance:

$$\dot{W} = \dot{M}_A \cdot (X_{A1} - X_{A0}) = \dot{M}_S \cdot (X_{S0} - X_{S1})$$

Energetická bilance:

$$\dot{Q} = \dot{M}_A \cdot (h_{A1} - h_{A0}) + \dot{M}_S \cdot (h_{S1} - h_{S0})$$



Obrázek 3 – Bilance sušárny [10]

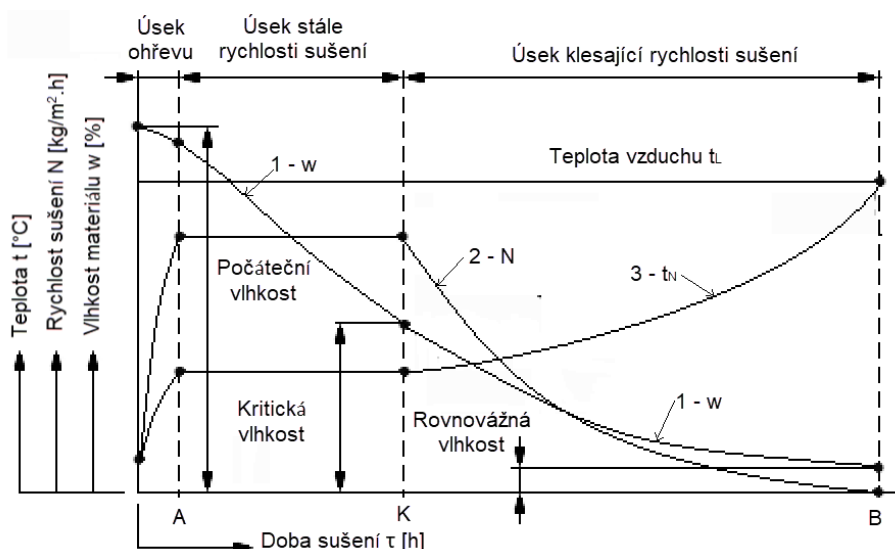
2.3 Kinetika sušení

Kinetika sušení zahrnuje požadavky na rychlost sušení a jak dlouho je třeba sušit materiál na to, aby byly dosaženy požadované konečné parametry. Průběh sušení se dá, dle grafu (Obr. 4), rozdělit na tři části: [1,2]

1) Ohřívání na odpařovací teplotu – Tato fáze probíhá rychle, v porovnání s celkovou délkou sušení jde spíše o zanedbatelnou část, případně splývá s následujícím úsekem. Jakmile dojde ke kontaktu vzduchu se sušeným materiálem, dochází k jeho zahřívání a rychlost sušení vzroste na jeho maximální hodnotu. Na konci tohoto úseku se teplota na povrchu ustálí. [2,10]

2) Úsek konstantního sušení materiálu – V tomto úseku sušení se z povrchu sušeného materiálu odpařuje volná voda, do té doby, než se zcela vypaří. Délka této části závisí na pórovitosti materiálu, vlhkosti, velikosti částic a na parametrech sušícího vzduchu. Po celou dobu konstantního sušení se teplota materiálu nemění, protože se dodávané teplo spotřebuje pouze na vypaření kapaliny. Zvyšování rychlosti v tomto úseku je možné zvýšením rozdílu parciálních tlaků, vyšší teplotou a rychlostí vzduchu a jeho nižší relativní vlhkostí. [2,10]

3) Úsek klesající rychlosti sušení – V tomto úseku sušení probíhá odpařování vázané vody z pórů. Jelikož k povrchu materiálu nemůže být přiváděno tolik vlhkosti, kolik se jí za stávajících podmínek odpaří, rychlost sušení rychle klesá až na nulu. Tento stav nastane po dosažení rovnováhy tlaku par nad povrchem sušeného materiálu s parciálním tlakem par v sušárně. [2,10]



Obrázek 4 – Časový průběh teploty, rychlosti sušení a vlhkosti [2]

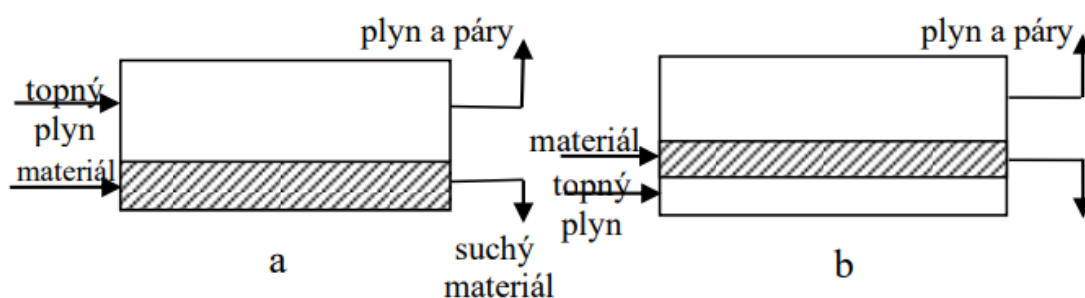
2.4 Způsoby sušení

Sušení může probíhat za atmosférického či sníženého tlaku a podle způsobu předávání tepla materiálu se dá rozdělit do tří skupin: [1,5-7,10]

1. **Konvektivní sušení** – Sušení přímé. Materiál je ohříván kontaktem se sušícím médiem, které následně odvádí odpařenou vlhkost. Teplota sušícího media musí být vyšší než teplota sušeného produktu.

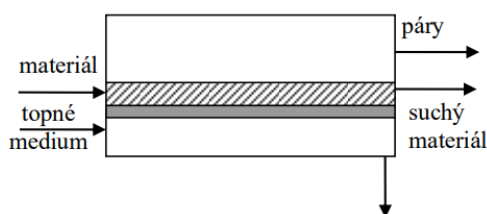
Konvektivní sušení může být realizováno dvěma způsoby:

- a) Sušení z objemu – Sušící medium prochází materiálem.
- b) Sušení z povrchu – Sušící medium proudí nad materiálem.



Obrázek 5 – Schéma sušení z povrchu (a) a z objemu (b) [5]

2. **Konduktivní sušení** – Sušení nepřímé. Materiál je ohříván kontaktem s teplosměnnou plochou, která bývá zahřívána párou či ohřátou kapalinou. Materiál může být pouze nanesen na plochu a zůstat nepohyblivý nebo může být promícháván pomocí mechanických prostředků. Konduktivní sušení může probíhat za podtlaku, což zintenzivní celý proces a díky tomu, že sušený materiál nemůže přijít do kontaktu se sušícím médiem, lze sušit citlivé a málo tepelně odolné látky.



Obrázek 6 – Schéma nepřímého konduktivního sušení [5]

3. **Radiační sušení** – Materiál je ohříván pomocí elektromagnetických vln, konkrétně infračerveným zářením nebo mikrovlnami. Vzhledem k tomu, že se záření dokáže šířit v libovolném prostředí, může se využít sušení ve vakuu, které bývá šetrnější např. pro potraviny. Radiační záření jako takové se uplatňuje především při sušení citlivých materiálů na mechanické namáhání a teplotu a při dosušování materiálů. Vlny pronikají do materiálu a ohřívají jeho vnitřek, zatímco okolí se vlnami nezahřívá. Vlhkost je pak hnána do míst s nižším tlakem, konkrétně na povrch materiálu. Generace tepla je závislá na obsahu vody v materiálu.

3 Sušárny

Sušárny jsou přístroje, které slouží ke sušení materiálu za přívodu tepla. Při sušení dochází k současnému sdílení hmoty a tepla.

3.1 Klasifikace sušáren

Sušárny lze klasifikovat podle následujících kritérií: [1]

Podle způsobu přívodu tepla:

- Konvekcí
- Kondukcí
- Radiací
- Mikrovlnné

Podle sušícího media:

- Vzduch
- Spaliny
- Inertní plyny
- Vakuum
- Přehřátá pára

Podle pohybu sušeného materiálu:

- V klidu
- Mechanické přesouvání – Přpravování pásy, rotující buben.
- Pneumatické přesouvání – Přpravování proudem vzduchu

Podle provozu:

- Kontinuální
- Periodický

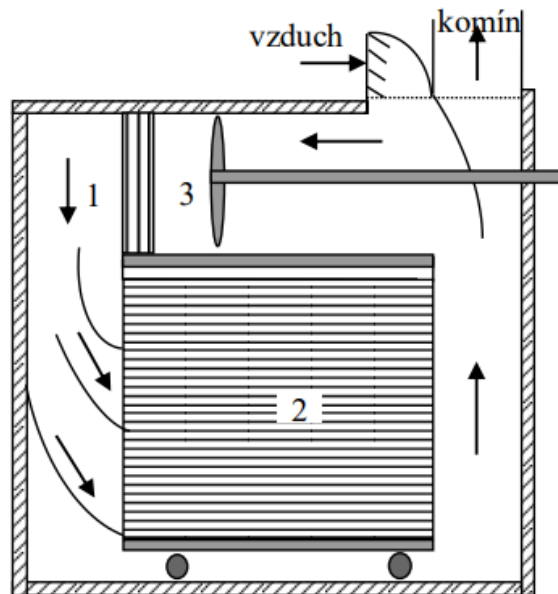
3.2 Konvektivní sušárny

Jedná se o sušárny s přímým způsobem sušení. U konvenčních sušáren je možné použít i recirkulaci sušícího media.

3.2.1 Komorové sušárny

Nejjednodušší typ sušárny s přímým sušením. Sušárna je uzavřená a tepelně izolovaná skříň, do které se zaveze vozík s policemi naskládanými nad sebe. Materiál tvoří tenkou vrstvu na polici. Ve skříni cirkuluje vzduch ohříváný kaloriferem. Množství vzduchu je regulováno klapkami. Sušení probíhá rovnoměrně z povrchu, ale doba sušení je dlouhá a má nízký odpařovací výkon, který je přibližně $1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Sušení probíhá za teplot od $105 \text{ }^\circ\text{C}$ do $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a za periodického provozu. Tyto sušárny mají sice univerzální použití, ale jsou vhodné jen na malé množství materiálu. Komorové sušárny jsou vhodné pro sušení,

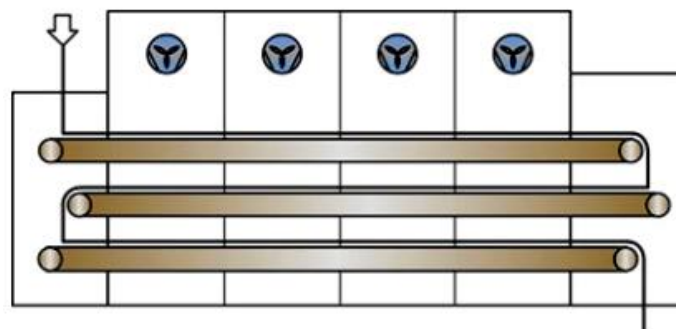
kde převládá vnitřní difúzní odpor, což jsou především kusové látky jako např. ovoce, bobuloviny, maso a zelenina. [1,5]



Obrázek 7 – Schéma komorové sušárny [5]
1- kalorifer, 2 – vozík s patry 3 – ventilátor

3.2.2 Pásové sušárny

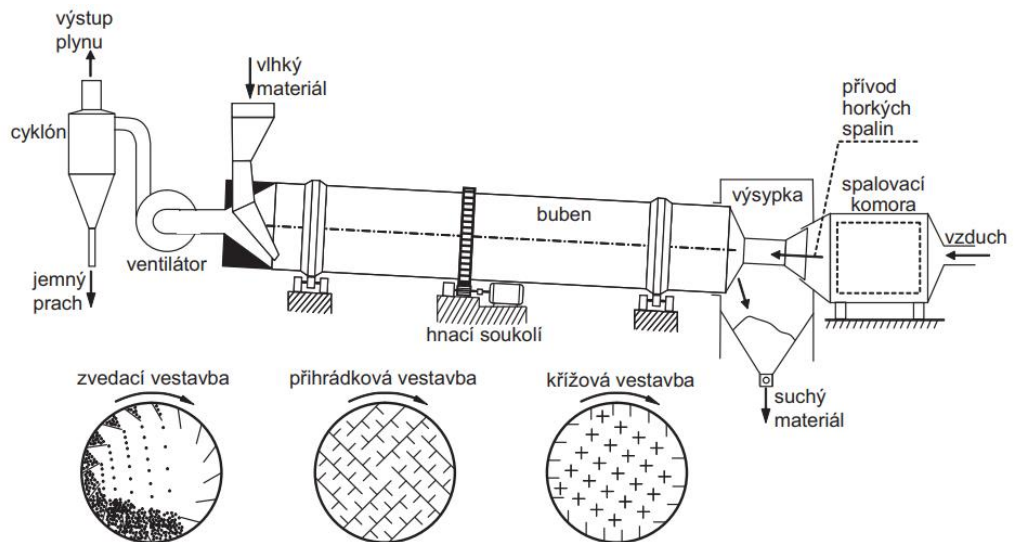
Pásové sušárny sestávají z jednoho až sedmi pásových dopravníků umístěných pod sebou. Tyto pásy se většinou pohybují v opačném směru. Materiál je nakládán na vrchní dopravník, který ho přepraví na svůj konec, kde spadne na pás pod ním. Toto přepadávání materiál promíchává a obvykle ho i obrací. Na posledním dopravníku materiál sušárnu opouští. Většinou probíhá sušení z povrchu. V případě provedení pásové sušárny s jedním dopravníkem sušárna sestává z jednoho delšího izolovaného tunelu. Sušící medium proudí protiproudě nad materiálem rychlostí do 5 m/s, o teplotě od 80 do 150 °C. Provoz těchto sušáren je kontinuální, jejich odpařovací výkon se pohybuje od 10 do 100 kg/m²h a spotřeba tepla od 4 do 5 MJ/kg sušeného materiálu. Doba sušení je dlouhá a suší se materiály s vyšší počáteční vlhkostí jako je například ovoce, zelenina, obilí, různé granule, krystaly nebo i dřevní hmoty. [1,5]



Obrázek 8 – Schéma pásové sušárny [5]

3.2.3 Rotační bubnové sušárny

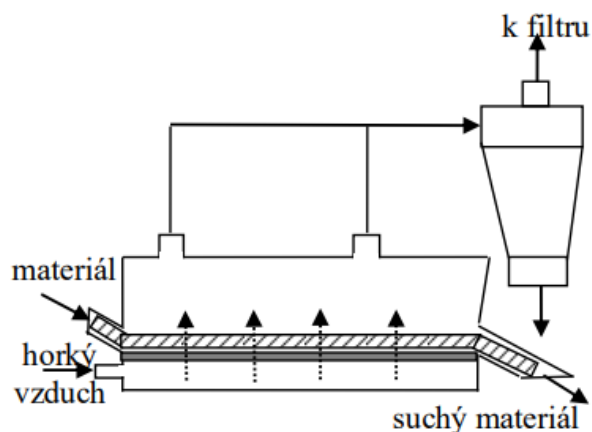
Rotační bubnové sušárny tvoří válec, přibližně 3 až 15 metrů dlouhý, 1 až 3 metrů široký. Průměr obvykle představuje 10 až 35 % jeho délky. Buben se otáčí od 1 do 8 otáček za minutu. Bubny bývají opatřeny vestavbami v podobě lopatek, které přesypávají materiál a tím se promíchává. Optimální zaplnění tvoří přibližně 10–15 % objemu válce. Probíhá sušení z povrchu. Sušárna může být vyhřívána sušícím médiem, proudícím skrze buben jak souproudě, tak protiproudě. Souproud je vhodný pro teplotně citlivé materiály, protiproud je vhodnější pro maximální dosušení, případně i pro odstranění chemicky vázané vody (proces kalcinace). Provoz je kontinuální a rozsah teplot může dosahovat až 500 °C, s tím ale souvisí i jejich velké riziko požáru. Odpařovací výkon bývá od 30 do 80 kg/m³.h. Spotřeba tepla se pohybuje od 4 do 8 MJ/kg. Rotační bubnové sušárny jsou vhodné pro polydisperzní materiály s požadavkem na delší dobu zdržení v sušárně, krystalické i drobné kusové keramické materiály, či zrněné maso a dřevní hmoty. [1,5,40]



Obrázek 9 – Schéma rotační bubnové sušárny [6]

3.2.4 Fluidní sušárny

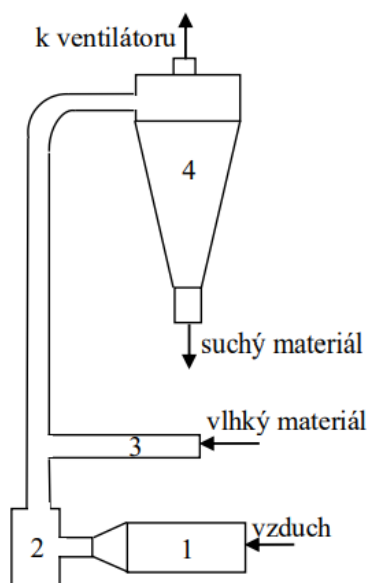
Ve fluidních probíhá sušení z objemu. Sušící medium má teplotu od 100 do 200 °C, využívá se spalin nebo horkého vzduchu. V sušárně se materiál gravitačně přesouvá po fluidním loži, které je mírně nakloněné a může horizontálně vibrovat. Sušící medium prochází skrze lože a způsobí fluidizaci materiálu, částice materiálu se navzájem nedotýkají a nejsou unášeny proudem plynu pryč ze sušárny. Fluidní stav materiálu dovoluje velký kontakt se sušícím médiem, což dovoluje k probíhání intenzivnějšího přestupu tepla. Sušení je tedy rychlejší a více tepelně účinné. Zároveň se díky fluidnímu stavu materiál neustále pohybuje a promíchává. Vzduch je pak veden do cyklonu, kde se odstraní stržené jemné částice a následně odchází do atmosféry. Provoz fluidních sušáren může být kontinuální i periodický. Odpařovací výkon dosahuje přibližně kg/m³.h a spotřeba tepla se pohybuje od 3 do 4 MJ/kg sušeného materiálu. Fluidní sušárny jsou vhodné pro monodisperzní jemně až zrnité materiály, tzn. obilí, krystaly cukru, glukóza, různé chemikálie, vláknité materiály, ale může se využít i pro sušení ovoce a zeleniny. [1,5]



Obrázek 10 – Schéma fluidní sušárny [5]

3.2.5 Proudové sušárny

V proudových sušárnách probíhá sušení z objemu. Sušící medium suší a zároveň unáší a dopravuje materiál potrubím, které bývá 10 až 20 metrů dlouhé. Tento materiál nesmí být lepkavý a abrazivní. Materiál může být dávkován šnekovým podavačem do proudu plynu o rychlostech od 10 až 40 m/s. Částice, které sušící medium neunesou, padají do mlýna pod dávkovačem, kde jsou rozemlety a dále vneseny proudícím vzduchem do potrubí. Vysušený materiál je oddělen od proudu plynu v cyklonu, případně až ve filtru za cyklonem. Doba sušení je velice krátká, kolem 10 sekund, tudíž je tento typ sušárny vhodný pro látky citlivé na teplo. Vzhledem k otěru a velkému počtu nárazů na stěny, či mezi sebou, je materiál degradován. Odpařovací výkon se pohybuje od 4 do 300 kg/m³.h a spotřeba tepla od 3,5 do 8,8 MJ/kg. Sušárna je provozována v kontinuálním režimu a je vhodná pro práškovité, zrnité nebo vláknité materiály, pokud nejsou citlivé na mechanické poškození a nejsou abrazivní. To zahrnuje škrob, lepký, kvasinky, polévky, kostní moučky, různé polymery. [1,5,9]

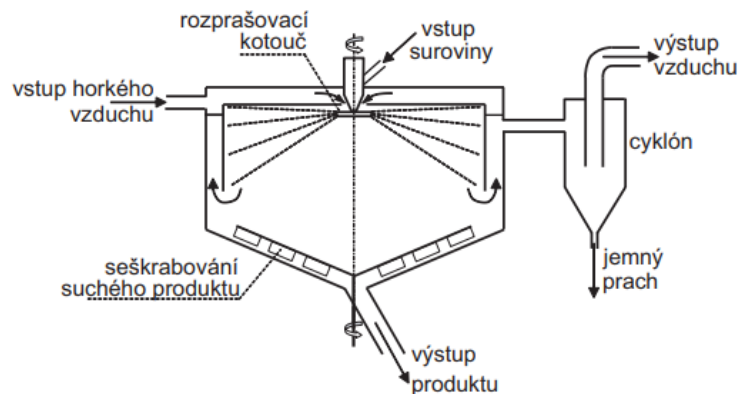


Obrázek 11 – Schéma proudové sušárny [5]

1 – kalfifer, 2 – ventilátor, 3 – šnekový dávkovač. 4 – cyklon

3.2.6 Rozprašovací sušárny

V rozprašovacích sušárnách probíhá sušení z objemu. Suší se disperze rozprášená tryskami nebo rotujícím diskem, který může dosahovat až 10 000 ot/min. Sušený materiál je rozprášen na malé částice do proudu horkého vzduchu, se kterým je v kontaktu 3 až 30 sekund. S klesající velikostí částic se zvedá intenzita sušení. Většinou souproud, ale vyskytují se i jiné varianty. Rychlost kapek dosahuje až 150 m/s, průměry kapek 10-100 μm . Proud horkého vzduchu dosahuje rychlostí do 1 m/s. Odpařením kapaliny ze sušeného materiálu vzniká jemný prášek. Slouží k šetrnému sušení mléka, vajec, zmrzlinových směsí, dětské výživy, ovocných šťáv, škrobu, instantních potravin, barviv, plastů, léčiv a mycích prášků. Vzhledem k rychlému sušení jsou vhodné pro sušení termolabilních látek. Odpařovací výkon je 1.5 až 48 $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$. Spotřeba tepla 4.6 až 11 MJ/kg. [1,5,6,9]



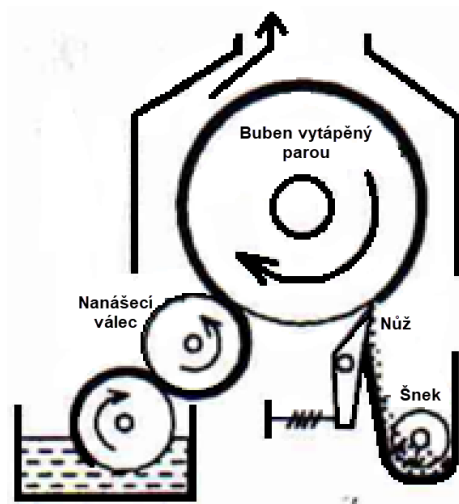
Obrázek 12 – Schéma rozprašovací sušárny [6]

3.3 Konduktivní sušárny

Jedná se o sušárny s nepřímým způsobem sušení. Využívá se teplosměnných ploch vyhříváných většinou vodní páry, či ohřáté vody.

3.3.1 Válcové sušárny

Válcová sušárna může být v jednoválcovém nebo dvouválcovém provedení. Válce jsou vyhřívány zevnitř a otáčejí se rychlostí od 2 do 8 otáček za minutu. Materiál se nanáší na válce z míchaného zásobníku pomocí menších válečků. Materiál je nanášen ve formě řídké nebo kašovité suspenze, pastovité, těstovité nebo lepivé husté kapaliny. Ve dvouválcovém provedení se materiál nanáší mezi válce, které se otáčejí proti sobě. Během otočky válce se materiál usuší a do zásobníku je pak seškrabován mechanickou škrabkou či nožem. Odpařovací výkon se pohybuje od 7 do 30 $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ a spotřeba tepla od 2,9 do 5,7 MJ/kg. Sušárna provozována v periodickém režimu a je vhodná pro pastovité či kapalné látky jako jsou kvasnice, dětská výživa, ovocné a zeleninové vločky a různá krmiva. U dvouválce jsou vhodné i pařené brambory. [1,5]



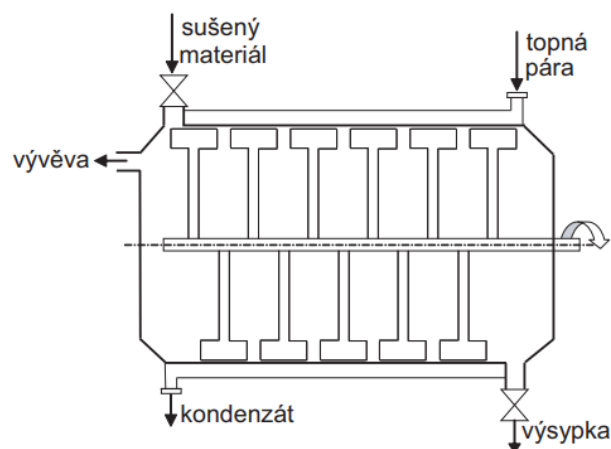
Obrázek 13 – Schéma válcové sušárny [1]

3.3.2 Rotační bubnové sušárny

Konduktivní rotační bubnové sušárny se skládají z válce podobně jako u konvektivní rotační bubnové sušárny. Hlavním rozdílem jsou však trubky, které vedou bubnem a vyhřívají ho. V trubkách proudí topné médium, které je buď vodní pára, nebo ohřátá voda. Spotřeba tepla se pohybuje od 3,8 do 6,3 MJ/kg. Jsou vhodné pro polydisperzní materiály s požadavkem na delší dobu zdržení v sušárně, krystalické i drobné kusové keramické materiály, či zrněné maso a dřevní hmoty. [1]

3.3.3 Lopatkové sušárny

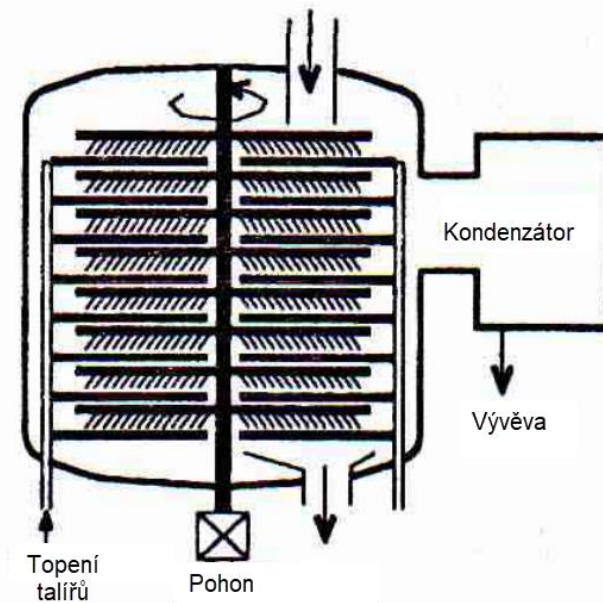
Lopatková sušárna se skládá z nepohyblivého horizontálního žlabu vyhříváný pláštěm, ve kterém se pohybuje lopatkové míchadlo. Toto míchadlo může být zevnitř vyhříváné, a hlavně zajišťuje promísení sušeného materiálu, které je v kontaktu s vyhříváním pláštěm, které tvoří teplosměnnou plochu. Sušárna je vhodná pro hrudkovité materiály, acetáty, celulózy, škroby, barev nebo práškovité kovy. V sušárně se vyskytuje vakuum nebo podtlak. Lopatková sušárna je provozována v periodickém režimu s odpařovacím výkonem od 10 do 15 kg/m².h a spotřebou tepla od 2,9 do 4,2 MJ/kg. Při dosušování je odpar jen 0,5 kg/m².h. [1,5,6]



Obrázek 14 – Schéma lopatkové sušárny [6]

3.3.4 Sublimační (lyofilizační) sušárny

Sušený materiál je nejdříve prudce zmrazen, aby vznikly malé ledové krystalky, které nepoškodí strukturu materiálu. Materiál se ochlazuje vakuovým chlazením, přímým kontaktem s kapalnými plyny nebo odvodem tepla do chlazených kontaktních ploch. Během sublimace prováděné za tlaku od 10 do 100 Pa se přivádí teplo z kontaktních ploch, ale nesmí přitom dojít k překročení tání ledu. Existují i varianty s infračerveným nebo mikrovlnným ohřevem. Vodní pára je pak odsáta pryč ze sušicí komory vývěvou do odtokového kondenzátoru. Sublimační sušení je energeticky a investičně nejnáročnější a používá se při extrémních nárocích na kvalitu produktu nebo k prodloužení trvanlivosti potravin v regálech – čaj, káva, krevní plazma, žampiony, ovoce a zelenina. [1,6,19]



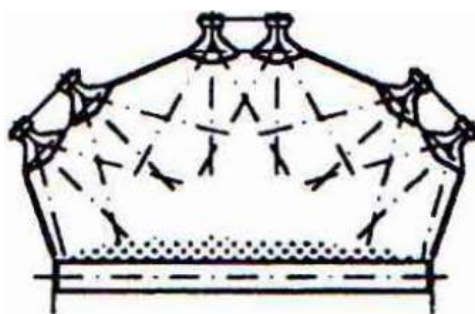
Obrázek 15 – Schéma Krauss Maffei - kontinuální talířové sublimační sušárny [1]

3.4 Radiální sušárny

Přenos tepla u radiálních sušáren probíhá vyzařováním neboli sáláním. Principem sušáren je v podstatě bezkontaktní dodání tepelné energie do sušeného materiálu.

3.4.1 Sušárny s infračerveným ohřevem

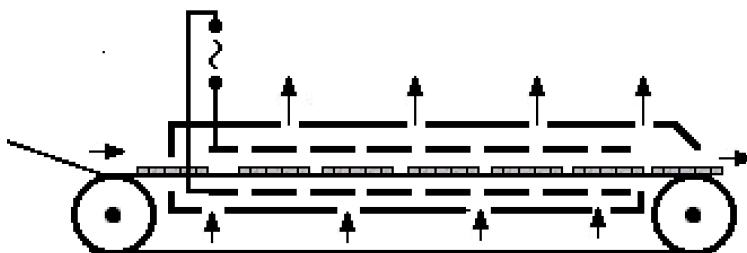
Infračervené záření způsobuje povrchový ohřev sušeného materiálu. Záření je emitováno žárovkami, topnými tělisky nebo porézními keramickými tělisky, na kterých probíhá spalování plynu. Vlhkost je odsávána v podobě plynu. Existují provedení, která kombinují infračervené záření s konvektivním vytápěním. Odpařovací výkon může dosahovat až $35 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Infračervené sušárny jsou vhodné pro sušení nátěrů automobilů, papíru, textilu, ovoce, zeleniny, kakaových bobů a zrní. Jsou provozovány v periodickém režimu. [1,6]



Obrázek 16 – Schéma sušárny s infračerveným ohřevem [1]

3.4.2 Sušárny s dielektrickým ohřevem

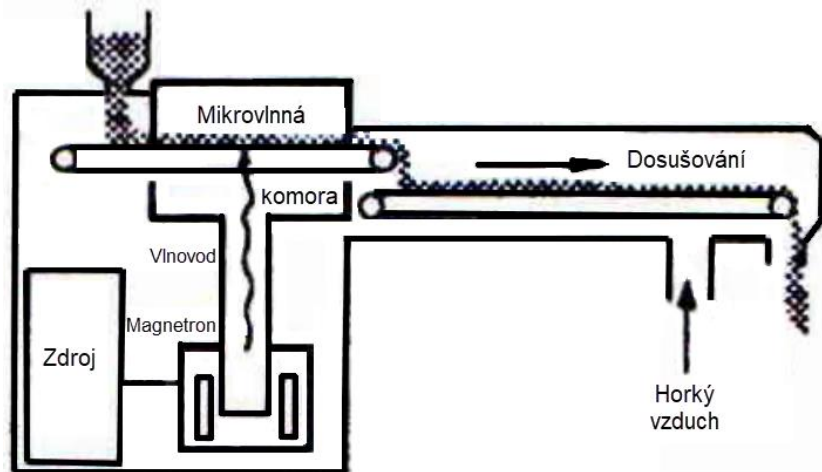
Sušárna je vyhřívána dielektrickým elektromagnetickým polem tvořené dvěma elektrodami, mezi kterými prochází pás, který přenáší sušený materiál viz schéma (Obr 17.). Teplo v materiálu vzniká skrze třecí ztráty, které vytvářejí teplo a následně probíhá sušení. Frekvence elektromagnetického pole se pohybuje od 1 do 200 MHz. Sušárny s dielektrickým ohřevem mohou být provozovány v periodickém i kontinuálním režimu. Spotřeba energie je přibližně 3 MJ/kg . Sušárna je vhodná pro sušení dřeva, papíru, plastu a termolabilních potravin. [1]



Obrázek 17 – Schéma sušárny s dielektrickým ohřevem [1]

3.4.3 Mikrovlnné sušárny

Mikrovlnné sušení se uplatňuje při sušení materiálů citlivých na mechanické namáhání a teplotu. Mikrovlny generuje magnetron o frekvencích mezi 915 a 2450 MHz. Kromě sušení citlivých materiálů využívají na dosušování materiálů. Mikrovlny ohřívají především polární látky – vodu, tuky, některé plasty. Jsou vhodné pro sušení nátěrů, lepidel, papíru, kůže, textilie, léky, keramiku, PVC, polyamidy, ovoce, zeleniny, rýže, brambůrky, těstoviny a tabák a obecně látek s nízkou vlhkostí. Také se však uplatňuje u sušení materiálů s buněčnou strukturou, jako je třeba dřevo, z důvodů rychlejšího lokálního vytváření tepla v místech, kde je dostatek volné vody. [1,6]



Obrázek 18 – Schéma mikrovlnné sušárny [1]

3.5 Porovnání sušáren a výběr navrhované sušárny

V následující části budou porovnávány sušárny v tabulkách, díky kterým lze určit vhodný typ sušeného materiálu v sušárnách, nebo naopak vhodnou sušárnu pro určitý materiál s ohledem na energetickou náročnost.

Porovnání sušáren dle kritérií: **typ materiálu** vhodného pro sušení, **kapacita materiálu**, který nám určuje množství sušeného materiálu, a **tepelný výkon**, který je potřebný k sušení materiálu.

Tabulka 1 – Porovnání sušáren [1]

Typ sušárny:	Materiály			Kapacita materiálu [kg/čas]			Tepelný výkon		
	S	P	R	ML	MM	MH	QL	QM	QH
Komorová	O	+	+	+	O	-	+	-	-
Pásová	-	O	+	+	+	O	+	+	O
Bubnová	-	-	+	O	+	+	O	+	+
Fluidní	-	O	+	+	+	+	+	+	+
Proudová	-	-	+	-	+	+	O	+	+
Rozprašovací	+	O	-	+	+	+	+	+	+
Válcová	O	+	+	+	O	-	+	-	-
Bubnová Konduktivní	-	O	+	+	+	O	+	+	O
Lopatková	O	+	+	+	+	-	+	+	-
Sublimační	O	+	+	+	O	-	+	+	-
Infračervený ohřev	O	+	+	+	O	-	+	-	-
Dielektrický ohřev	-	O	+	+	+	O	+	+	O
Mikrovlnné	+	+	-	+	O	-	+	O	-

Legenda:

S-suspenze, P-pastovité materiály, R-partikulární materiály

ML-nízká kapacita, MM-střední kapacita, MH-vysoká kapacita

QL-nízký tepelný výkon, QM-střední tepelný výkon, QH-vysoký tepelný výkon

+ sušárna vyhovuje

- sušárna nevyhovuje

O záleží na okolnostech

Obecné srovnání výhod a nevýhod vybraných sušáren a jejich oblastí využití. [1,5,6,29-37]

Tabulka 2 – Srovnání sušáren dle výhod a nevýhod

Typ sušárny	Výhody	Nevýhody	Využití
Komorová	S každou dávkou se zachází samostatně Levná Jednodušší ovládání provozních parametrů	Není vhodná pro masové produkce V nižších zásobnících se materiál přesušuje Časově náročné (5-45 hodin na jednu dávku)	Farmaceutický průmysl Chemický průmysl Potravinářství Zemědělství
Bubnová	Vysoká kapacita, bývají automatické, kontinuální provoz Vysoká tepelná účinnost Flexibilní řízení rychlosti plynu	Těžko se těsní Produkt se usazuje na vnitřních stěnách Nebezpečí požáru Doba sušení je nerovnoměrná	Chemický průmysl Těžební průmysl Zemědělství
Válcová	Rychlost sušení Energeticky účinná Dobrá rehydratace produktu	Některé produkty se špatně nanášejí Nutná přesnost konstrukce	Potravinářství Chemický průmysl
Fluidní	Rychlé a homogenní sušení Vhodné pro kontinuální i periodické provozy	Těžko se suší lepkavé materiály, Drahé, Možnost ztráty produktu kvůli turbulentnímu stavu během sušení	Chemický průmysl Zemědělství Potravinářství
Rozprašovací	Rychlost sušení Vhodné pro materiály citlivé na teplo Možnost ovlivňovat velikost sušených částic	Drahá údržba a vysoké počáteční náklady Sušený materiál musí být kašovitý až tekutý Nízká tepelná účinnost Obtížné se čistí	Chemický průmysl Farmaceutický průmysl Potravinářství
Mikrovlnná	Velká kontrola nad sušením Šetrné a homogenní sušení	Vysoké pořizovací náklady Může ovlivňovat texturu produktu	Zemědělství Potravinářství Stavebnictví

Přichází k úvahu komorové, bubnové, fluidní, pásové i proudové sušárny. Avšak konkrétně u biomasy, komorové sušárny nejsou vhodné pro větší množství a neprobíhá homogenní sušení. Fluidní sušárny jsou dražší a nejsou vhodné pro větší množství materiálů. Pásové sušárny zabírají příliš místa a jsou mají vyšší spotřebu energie. Proudové se zbavují především volné vody, jelikož se materiál zdrží jen krátce. Tudíž pro odpadní biomasu jsou vhodné bubnové rotační sušárny, které jsou schopné větší produkce při kontinuálním provozu, jsou jednodušší pro návrh, a především jsou univerzální

v použití pro různé typy materiálů. Pro zvolený materiál, což je dřevní štěpka, je pro návrh zvolena rotační bubnová sušárna především díky jejím výhodám.

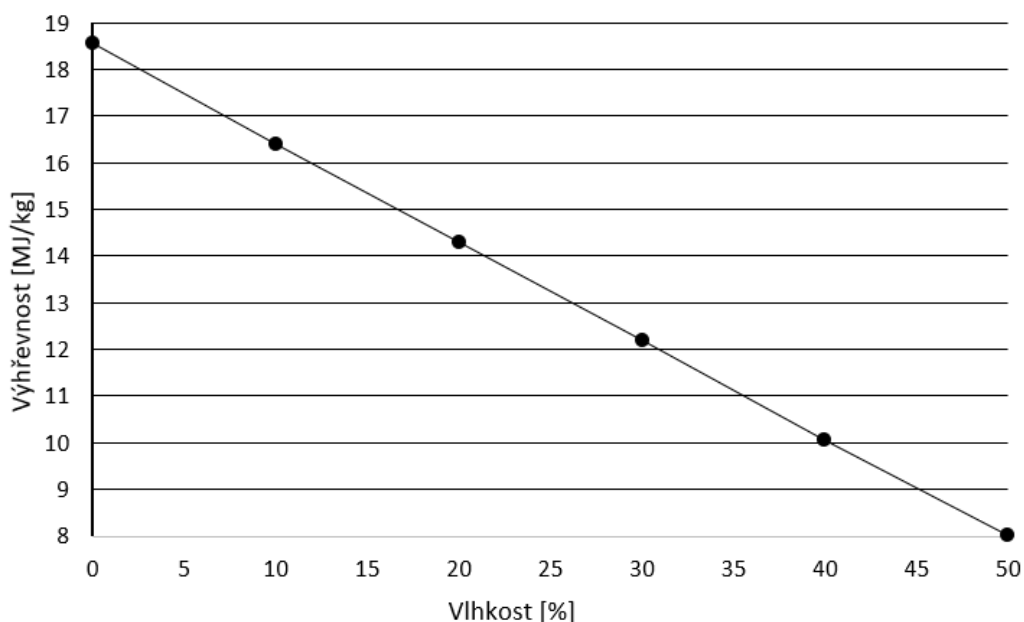
3.6 Aplikace sušení v průmyslu

3.6.1 Sušení biomasy

Využití biomasy závisí na jejích fyzikálních a chemických vlastnostech, které se úzce svazují s vlhkostí. Snížení vlhkosti má za následek zvýšení výhřevnosti, ale i snížení hmotnosti a zvýšení účinnosti spalování. Vlhkost je tedy všehovšudy důležitá vlastnost pro spalování, skladování, přepravu, využití a další zpracování biomasy. [11,13]

Využívají se dva typy sušení: [11,14]

1. **Pasivní sušení** – Nejlevnější metoda snížení vlhkosti, vyžaduje i nejméně vybavení a vkládané energie, zároveň je nejpomalejší a pro některé spalovací a zplyňovací systémy nevhodná. Spočívá v umístění paliva na volném vzduchu nebo přímo na slunci. Voda difunduje do okolního prostředí.
2. **Aktivní sušení** – vyžaduje vstup energie z vnějšího zdroje pro urychlení procesu sušení ke snížení hodnoty celkové vlhkosti na požadovanou hodnotu. Využití této energie znamená zvýšení nákladů. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti sušení je důležitý poměr plochy povrchu sušeného materiálu k jeho objemu. Čím větší plocha je vystavena proudění vzduchu, tím efektivněji probíhá sušení. Obvykle se proudící vzduch ohřívá, a to buď nevyužitým teplem z různých procesů nebo přímou vytápěcí jednotkou. Pro tuto metodu je důležitý poměr dodané energie k energii získané z vysušené biomasy



Obrázek 19 – Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti [12]

Během spalování biomasy s vysokým obsahem vody dochází k velkému uvolňování vodních par, které ochlazují kotel a zhoršují tak podmínky pro funkční spalování. Zkondenzovaná pára navíc reaguje s uhlíkatými složkami, dehtuje, a to má následně negativní vliv na efektivní tepelnou výměnu teplosměnných ploch. [13]

Pokles vlhkosti má tedy několik výhod: [13]

- Zvýšení kalorické hodnoty paliva
- Schopnost lepšího vzněcování
- Snazší hoření dosahující vyšších teplot
- Menší množství spalin
- Menší nároky kladené na spalinový systém (není potřebná velká odolnost proti vlhkosti)
- Zmenšení komínové ztráty

Nejvíce využívané typy sušáren u sušení biomasy:

- Fluidní sušárna
- Bubnová sušárna
- Rotační sušárna
- Šneková sušárna
- Proudová sušárna
- Sušárny s přehřátou vodní parou

3.6.2 Sušení v potravinářství

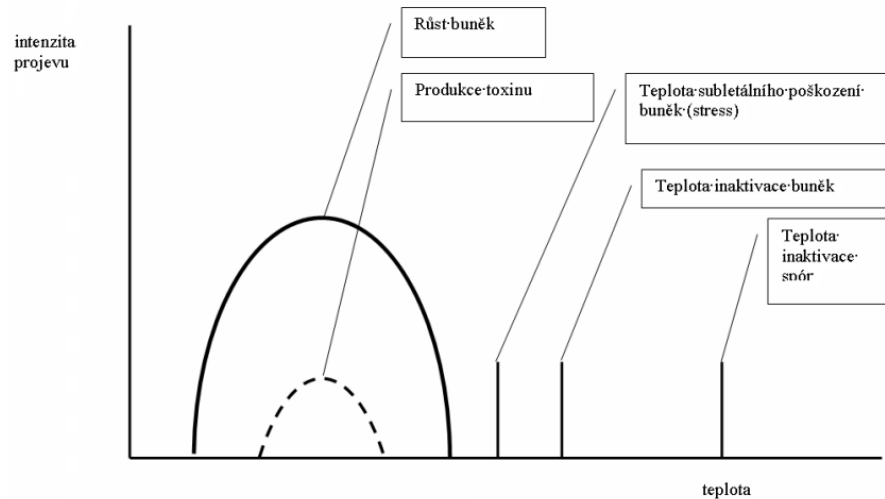
V potravinářství se sušení využívá především z důvodu konzervace. Jde hlavně o odebrání množství vody na to, aby se dostatečně snížila aktivita vody, která ovlivňuje tvorbu mikroorganismů. Tento jev se nazývá anabióza, což znamená zvyšování odolnosti potraviny. Nedosušené ovoce se lehko kazí a příliš sušené ovoce a zelenina trpí ztrátami jakosti. Zároveň zvolení nevhodného typu sušáren můžeme snížit kvalitu sušeného produktu. Odvádění vody může pro potravinu znamenat odvod minerálů a vitamínů, které se v ní vyskytují. Cílem tedy je udržet nutriční hodnoty, které spotřebitel očekává, udržet vlastnosti čerstvého materiálu, konzervace a zabránění tvorbě mikroorganismů a toxických látek a tím zabránění ohrožení zdraví spotřebitele a konzumenta. [15-17]

Ke snížení aktivity vody se využívá několik typů sušení: [15-19]

- Sušení horkým vzduchem – např. komorová sušárna
- Sušení vyhřívaným povrchem – např. válcová sušárna
- Sušení mikrovlnnými vlnami – voda se odpařuje vysokofrekvenčními
- elektromagnetickými vlnami
- Sušení infračervenými vlnami – zlepšení vlastností produktu (změna chuti, vůně, barvy)

- Sušení mrazem – lyofilizace – Zachování výživových látek a prodloužení životnosti. Princip je založen na sublimaci zmrzlé vody při nízkém tlaku a následného extrahování vlhkosti ve formě výparů.

Se zvyšující teplotou vzrůstá také rychlost množení mikroorganismů až k optimální teplotě růstu, k inaktivaci buněk dochází po dosažení inaktivační teploty, která je přibližně 65 °C. Po dosažení této teploty dochází k přerušení vitálních funkcí mikroorganismů a nevratným změnám buněčných membrán. K inaktivaci všech druhů spor je potřeba vyšší teploty, a to 121,1 °C. [16,17]



Obrázek 20 – Vliv teploty na projevy mikroorganismů [17]

Obecně se v potravinářství využívá velké množství různých sušáren, které jsou pro dané konkrétní využití. Nejvíce využívané typy sušáren v potravinářství se týkají však především ovoce a zeleniny. Z nich se využívají:

- Vakuová sušárna
- Infračerveného záření
- Mikrovlnná sušárna
- Komorová sušárna
- Tunelová sušárna
- Sublimační sušárna

3.6.3 Sušení ve stavebním průmyslu

Sušení se ve stavebním průmyslu využívá z různých důvodů. Jeden z nich je sušení materiálů, aby vznikly požadované vlastnosti. U dřeva má obsah vody vliv na pevnost lepených spojů, povrchové úpravy i na mechanické a fyzikální vlastnosti. Navíc k tomu má dřevo tendenci bobtnat při příjmu vlhkosti. Naopak při velké ztrátě vlhkosti dřevo sesychá natolik, že praská a bortí se. U dřeva pro stavební účely je tedy důležité ho vysušit tak, aby byla vlhkost v rovnováze s prostředím, ve kterém se bude výrobek vyskytovat, jinak může docházet k rozměrovým a tvarovým změnám. [20]

Dále se využívá u vysoušení bytů a staveb postižených povodněmi, či jiným vodním poškozením. Takové sušení vyžaduje dodržení některých podmínek, týkajících se především rychlosti sušení a teploty povrchu sušeného materiálu. Tyto podmínky vychází ze smršťování sušeného materiálu, které způsobuje napětí a následně mohou způsobit deformaci nebo i trhliny v materiálu. Velikost napětí závisí u stavebních materiálů ze stejné suroviny na tloušťce a tvaru. Při složitějších tvarech vzniká větší napětí. Jak už bylo naznačeno, při odpařování vody z materiálu nastává smršťování, a tudíž je třeba uvažovat faktory, které ovlivňují velikost napětí při sušení. Maximální rychlost sušení se tedy musí určit v závislosti jak na tvaru materiálu, tak tloušťce ale i citlivosti suroviny při sušení, aby nedošlo k nenávratnému poškození. K takovému sušení se využívá teplovzdušných zařízení ve vzdálenosti přibližně 1 metru. [2]

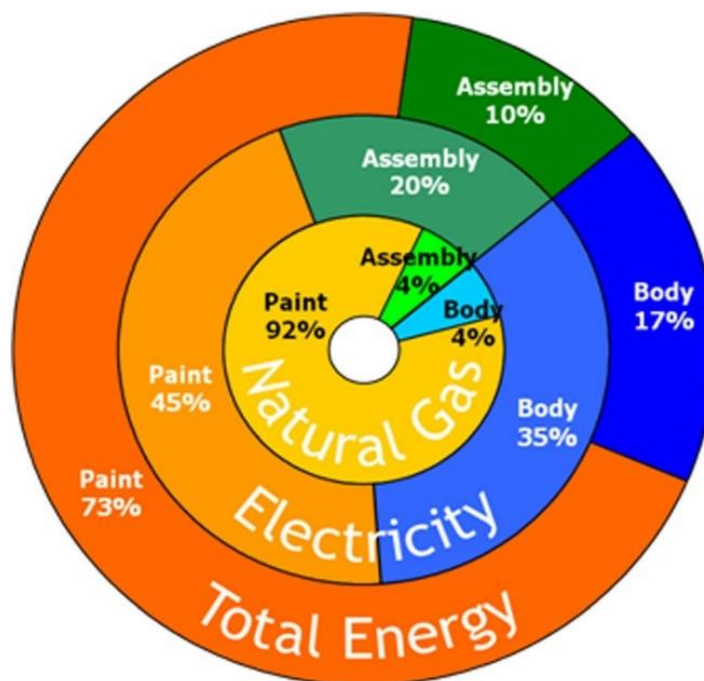
Sušení se využívá například i u odstraňování vody z cihel. Hlavní cíl je cihly vysušit na minimální vlhkost než putuje do pece. Pokud by se cihla vypalovala mokrá, nesnesla by rychlý nárůst vypalovací teploty a popraskala by. Zároveň by neměla dostatečnou pevnost k tomu, aby držela svůj tvar. [21]

Ve stavebním průmyslu se využívají:

- Komorové sušárny – dřeva, cihly apod.
- Mikrovlnné sušárny – nátěry
- Proudové sušárny – například sušení polystyrenu před zpracováním.

3.6.4 Sušení v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se sušení využívá na sušení laků. K tomu se využívá radiačních technologií, konkrétně ultrafialového záření, které aktivuje a urychlí chemické reakce. Dále se využívá i infračerveného záření. Nevýhoda těchto dvou technologií je taková, že se záření nedostane do skrytých míst u náročných tvarů. Dále se dá využít recirkulačního horkého vzduchu, které se využívá nejběžněji nezávisle na geometrii součásti. Existuje také technologie flash dry, která využívá dynamického pohybu horkého vzduchu a má za následek zmenšení potřebného času na sušení až o 50% u laků na bázi vody oproti běžnému sušení cirkulací horkého vzduchu. Sušení infračerveným zářením je však energeticky výhodnější. V automobilovém průmyslu má nanášení a sušení laků největší podíl využití energie ze všech procesů výroby. [22-24]



Obrázek 21 – Využití energie v automobilovém výrobním procesu [24]

V automobilovém průmyslu se tedy využívá:

- Infračerveného záření
- Ultrafialového záření
- Horkovzdušných sušáren
- Kombinace horkého vzduchu a záření

3.6.5 Sušení v chemickém průmyslu

Důvody sušení v chemickém průmyslu jsou různé, mezi ně se řadí stabilizace a konzervace materiálu, snížení nákladů na přepravu a skladování odstraněním přebytečného objemu kapaliny, k odstranění toxických zbytků, ke zlepšení manipulace s materiálem či cílenému vytvoření specifických pevných struktur a textur pro dosažení co největší aktivní povrchové plochy. Vzhledem k tomu, že se mění složení materiálů, se často může měnit i jejich chování během přepravy a skladování, či funkčnost materiálu samotného. Kvalita sušeného produktu je určována vlhkostí, přítomnost poškození materiálu tvorbou vnitřního pnutí, schopnost rehydratace, a změna objemu či tvaru. [1,6,25]

Využívá se mechanického i tepelného sušení. U mechanického je to zejména odstředivými silami. U tepelného sušení se využívá jak konvektivního, konduktivního, ale i radiačního sušení a jejich kombinace. V chemickém průmyslu se využívá přes 500 různých typů sušáren, z toho některé typy jsou široce používané, ostatní jsou specifikovaně vyrobené pro sušení jednoho produktu. [1,25]

V chemickém průmyslu se široce využívají:

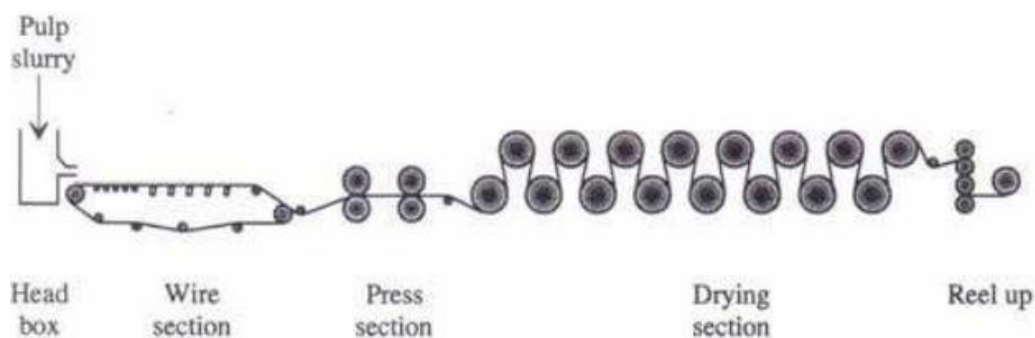
- Bubnové sušárny konvektivního i konduktivního typu
- Fluidní a vibrofluidní sušárny
- Proudové sušárny
- Rozprašovací sušárny
- Mikrovlnné sušárny
- Sušárny s dielektrickým ohřevem

3.6.6 Sušení v papírnictví

Výroba papíru spotřebovává velké množství vody, kterou je potřeba z finálního produktu odstranit. Během sušení se odstraňuje přibližně 1.2 kg vody na 1 kg papíru. Vlhký papír putuje skrze systém dutých válců do lisovací části a následně do sušící části. Válce jsou vyhřívány parou zevnitř. Na konci sušícího procesu papír obsahuje obvykle 5-10% vody. Jak je ze schématu zřejmé, sušící část je nejdelší částí z celé výrobní linky. Celá tato část je však zakrytá, hlavně z důvodu lehčího udržení podmínek pro sušení a dosažení konkrétních parametrů papíru. Výroba papíru jako taková je velice náročný proces z hlediska spotřeby jak vody, tak i energie. Tudiž je třeba uvažovat nad co nejvýhodnějším a nejefektivnějším způsobem výroby. [26]

Možnost využití mikrovlnných sušáren se také nevylučuje. Hlavní výhodou je dosažení rovnoměrného a jednotného vlhkostního profilu na požadované hodnotě. Absorpce vlnové energie je přibližně proporcionální obsahu vlhkosti v materiálu. Což znamená, že místa s větší vlhkostí se budou zahřívat více než místa s nižší vlhkostí. Hlavní nevýhodou je však energetická náročnost během celkového sušení, mohlo by se však využít mikrovlnných sušáren ke konečnému dosušování. [26]

Dále je využíváno infračerveného záření pro vysušování nepravidelných vlhkostních nahromadění či pruhů a tím výrazně vyrovnává vlhkostní profil. Využívá se především elektrických zařízení skrze jejich rychlou odezvu a přesnosti korekce. Existuje však i plynová varianta. Ke korekcím vlhkostního profilu se využívají i tryskové sušárny, které naopak přidávají vlhkost v sušších místech. Výhodou této metody je schopnost ovládnutí zvlnění a zmírnění napětí v materiálu. [26]



Obrázek 22 – Schéma výroby papíru [26]

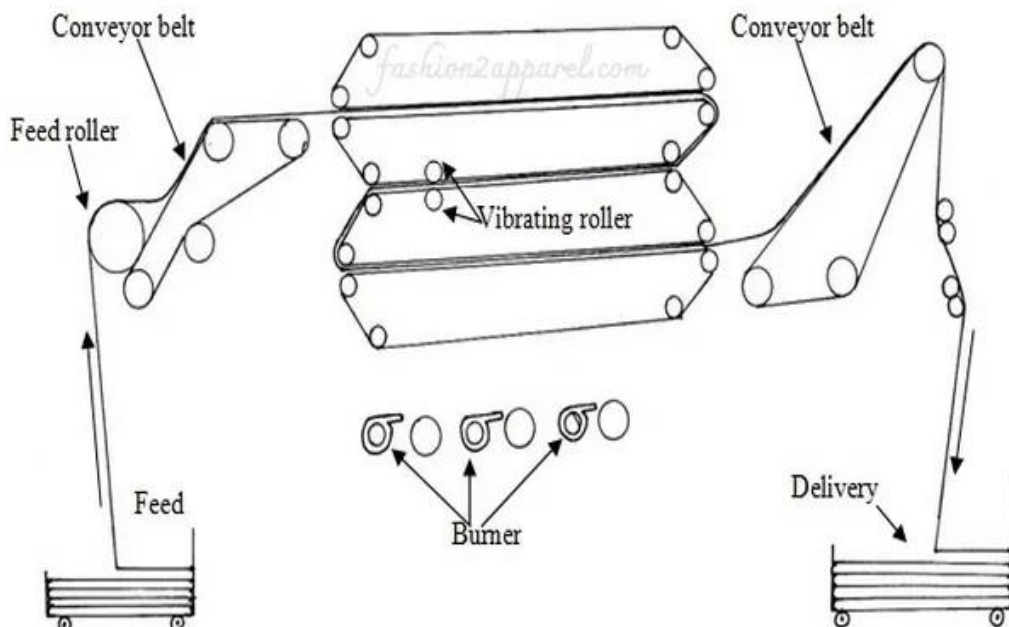
K sušení papíru se využívají:

- Víceválcové sušárny – buď dvouřadé nebo jednořadé
- Impaktní tryskové sušárny
- Sušení infračerveným zářením

3.6.7 Sušení v textilním průmyslu

V textilním průmyslu se materiály během výrobního procesu několikrát vlhčí a suší. Voda se hromadí ve tkaninách a přebytečná vlhkost se musí odstraňovat. Pro některé vlhkosti stačí mechanické odstraňování, ale pro celkové vysušení je třeba využít odpařovacích procesů. Zároveň se musí volit šetrných metod, jelikož textilní materiály bývají citlivé na teplo. Dbá se důraz na to, aby se příliš materiál nesrazil. Pro sušení se využívá infračerveného záření, proudění horkého vzduchu, konduktivních metod a mikrovlnných vln, a to hlavně ve válcovém systému. K docílení co největší účinnosti se v textilním průmyslu dosahuje co největšímu odstranění vody mechanickými způsoby, následně co nejrychlejší rychlostí vzduchu na povrchu materiálu za udržení vhodné teploty. Pokud teplota vzroste nad 150 °C, vzrostou i náklady. Dále se dbá na co nejmenší tepelné ztráty. [27,28]

Jelikož je textil mnohokrát barven, je ekologicky výhodnější využívat infračerveného záření z důvodu menšího znečištění, zároveň se dosahuje velké kvality a podmínky se dají lépe přizpůsobit konkrétnímu materiálu. Dochází k zrychlení výroby a zmenšení energetické náročnosti sušení. [27,28]

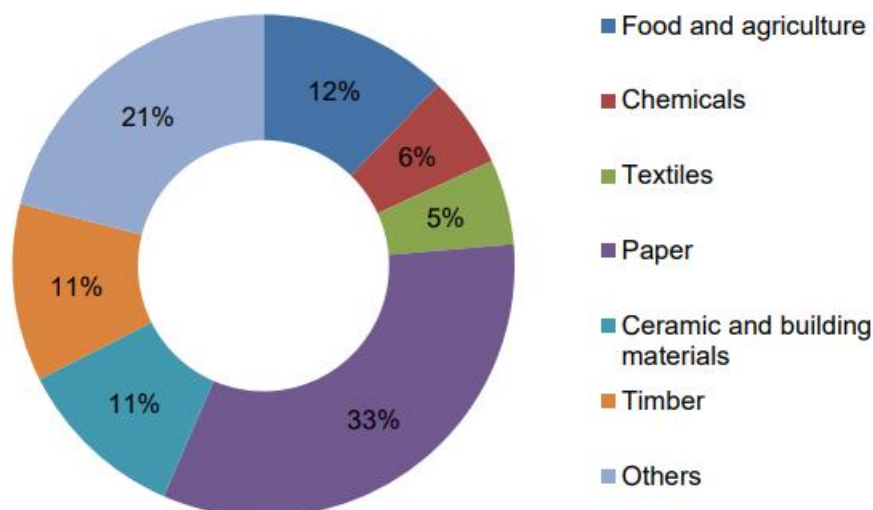


Obrázek 23 – Schéma sušičky textilů [27]

V textilním průmyslu se využívá:

- Mechanických sušiček
- Horkovzdušných sušáren
- Infračerveného záření

3.6.8 Shrnutí průmyslových aplikací



Obrázek 24 – Roční spotřeba energie na sušení v různých odvětvích v Nizozemsku, celkem 240 PJ [25]

Ve výše zobrazeném grafu je vidět roční spotřeba energie na sušení v jednotlivých odvětvích v Nizozemsku, které když se sečtou, tak činí 240 PJ. Zvýšení účinnosti energetické spotřeby v oblasti sušení je tedy nejen ekonomicky, ale i ekologicky žádoucí z pohledu evropského plánu snižování uhlíkové různých produkcí. Energetická spotřeba se různě liší vzhledem k využitému druhu sušení (mechanické, tepelné), a použitých zařízení. Zároveň ceny energií postupně rostou. [25]

Výrobci se s ohledem na dění snaží najít nové způsoby, jak zlepšit účinnost sušáren a jejich energetickou spotřebu, s ohledem na zachování kvality výrobků a na životní prostředí. [25]

Způsoby jak tak učinit se dají klasifikovat do několika skupin: [25]

1. Snižování potřebné tepelné energie mechanickým vysušováním – Využití mechanické energie pouze na odstranění volné vody a tepelné energie pouze na odstranění vázané vody by výrazně zmenšilo potřebu tepelné energie. Záleží však na materiálu, jelikož mechanické sušení některé materiály naopak poškodí.
2. Zvyšování účinnosti zmenšováním ztrát, optimalizováním proudění vzduchu a provozních dob sušení. Využití tepelných izolací. Avšak pokud má zařízení velkou povrchovou plochu, mohlo by se izolování výrazně podílet na nákladech.

Optimalizace provozních dob vysoce závisí na typu materiálu a odkazuje se především na to, aby se nepřesušoval materiál, nebo zbytečně nepřehříval.

3. Rekuperace tepla – ve výše zmíněném příkladu z Nizozemska by se dalo ušetřit přibližně 30 PJ energie, konkrétně zpětné získávání odpadního tepla k ohřevu vstupního vzduchu.
4. Recirkulovat již využitě teplo pro procesy jiných zařízení – především v případech, kdy vyfoukovaná pára má stále nad 100 °C.
5. Využívání odpadního tepla tak, aby se znovu využilo na sušení – konkrétně použití tepelných čerpadel k přeměně odpadního tepla na teplo využitelné pro další sušení. Pomocí čerpadla lze zvedat teploty nižší vyfoukávané teploty na vyšší teplotu pro následné vytápění sušárny. Záleží však na ceně např. elektrické energie, která je potřeba k opětovnému zahřívání. Využití tepelných čerpadel je však ekonomicky přijatelné jen při sušení vysoce kvalitních a ceněných materiálů.

Další možností může být využití matematických optimalizačních způsobů na navrhování co nejučinnějších tepelných výměn. Dá se říct, že se stále rostoucím výpočetním výkonem a dostupnějších nových detailnějších modelů procesů, využití energie se strukturní optimalizací sušícího provozu dá dosáhnout nejen kvalitnějších produktů, ale dosáhnout na optimálnější využití energie, a s tím získat i ekologičtější a ekonomičtější procesy sušení. [25]

4 Vývoj sušáren

Průmyslové sušení představuje dle odhadů 12 až 25 % celkové průmyslové spotřeby energie v rozvinutých zemích. Značná část z vyrobené energie je získávána spalováním fosilních paliv, které je spojováno s emisemi oxidu uhličitého a jiných plynů. Většina sušáren pracují s tepelnou účinností od 20 % do 80 %, průměrem tedy 50 %. Účinnosti sušáren však závisí na jejím typu a na teplotní citlivosti sušeného produktu. Zlepšení účinností tedy přímo souvisí s dopadem na životní prostředí, pokud se nevyužívá značné množství obnovitelných zdrojů místo fosilních paliv. Při navrhování sušáren se tedy začíná především ohlížet kromě doručení kvality na energetickou efektivitu a šetrnost k životnímu prostředí. I díky tomu spousta běžných jednoduchých způsobů sušení dožrálo a možná i dosáhlo limit svého výkonu. Navíc se neustále ukazují nové produkty, s tím nové procesy, které mají za následek vyšší sušící rychlost. Postupně přísnější ekologické předpisy, zvýšené dbání na bezpečnost často vyžadují vyšší účinnosti výkonu, než je možné u tradičních sušiček. Tyto potřeby vedly v posledních pár dekadách a neustále vedou k inovací technologií. [38]

V chemickém průmyslu je nejběžnější aplikací sušení výroba suchých partikulárních částic z roztoků a suspenzí, hustý past a granulových či pevných látek. K tomu se nejběžněji využívají válcové a rozprašovací sušičky. Rozprašovací sušičky dokázaly

dříve pouze vysušit kapalinu na jemný prášek, nyní je však možné sušit prášky na specifikovanou velikost částic a strukturu. [38]

Bezpečnost personálu obsluhující sušárny, zamezení znečištění životního prostředí a důraz na výrobu kvalitního produktu s minimálními náklady jsou při návrhu sušáren dnes ty nejdůležitější parametry. S pomocí výpočetních technologií, u kterých neustále roste výpočetních výkon, jsme schopni dnes provádět simulace, díky kterým získáváme lepší návrhy sušících komor a proudění vzduchu. Tyto návrhy se konkrétně využívají k návrhu rozprašovacích sušáren s minimálním usazováním ve stěnách komory. [38]

Do budoucna se předpokládá s miniaturizováním sušáren, miniaturizace sušáren však přináší spousty výzev ale zároveň benefitů. Hlavním důvodem je to, že sušící zařízení mají obecně velký objem a zabírají mnoho místa oproti objemu sušeného materiálu. Toto se však liší dle sušárny od zanedbatelného objemu (např. tenká vrstva na válcové sušárně) po slušnějších 10–20 % objemu u fluidní či bubnové sušárny. Větší rozměry sušárny znamenají i větší rozměry potrubí pro vzduchotechniku, větší objemy sušícího media, větší systémy sběru produktů, a tedy samozřejmě i vyšší pořizovací a provozní náklady. U konvektivních sušáren je 60–70 % nákladů životního cyklu způsobeno spotřebovanou energií, tudíž menší objemy sušáren jsou velice žádoucí. Pro některé typy sušáren je zmenšování jejich objemu v podstatě nemožné už jen s ohledem na omezování geometrie skrze skutečnost, že je třeba dopravit materiál ze vstupu do výstupu. Bubnové sušárny navíc nejsou schopny optimálně sušit více jak 15 % jejich objemu. U fluidních sušáren je potřeba materiál mít co nejlépe rozložen. [38]

Dále se předpokládá využívání chytrých sušáren a využívání postupně se rozvíjejících umělých inteligencí během sušení pro zdokonalení celých procesů.

5 Návrh sušárny na odpadní biomasu

Veškeré výpočty byly provedeny pro teoretické hodnoty, tudíž se nezabývalo tepelnými ztrátami, které by dále ovlivnily výpočty.

Zadané parametry:

- Obsah vody sušeného paliva – $W_0 = 50 \%$
- Obsah vody vysušeného paliva – $W_1 = 20 \%$
- Množství sušeného paliva – $M_{pv0} = 100 \text{ kg/h}$
- Teplota paliva na vstupu – $t_{s0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota vzduchu na vstupu – $t_{A0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Relativní vlhkost vzduchu na vstupu – $\varphi_0 = 50\%$

Volené parametry:

- Teplota vzduchu na výstupu – $t_{A1} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- Relativní vlhkost vzduchu na výstupu – $\varphi_1 = 70\%$

Sušené palivo – smrková dřevní štěpka

- Přibližná hustota dřevní štěpky $\rho_s = 250 \text{ kg/m}^3$
- Měrná tepelná kapacita sušiny: $c_{ps} = 1,4 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$



Obrázek 25 – Smrková dřevní štěpka [41]

Smrková lesní štěpka má na našem území zásadní podíl, to vychází už jen ze skutečnosti, že smrkové lesy tvoří přibližně 50% rozlohy českých lesů. Kolem roku 2014 se u nás vyprodukovalo až 1 900 000 tun lesní štěpky ročně, tudíž se dá uvažovat, že se kolem roku 2014 vyprodukovalo přibližně 950 000 tun smrkové lesní štěpky. Od té doby se u nás těžba dřeva zvyšuje. [43]

5.1 Hmotnostní bilance materiálu

- Sušené palivo: $M_{pv0} = 100 \text{ kg/h}$
- Množství sušiny v palivu: $M_s = M_{pv0} \cdot (1 - W_0) = 100 \cdot (1 - 0,5) = 50 \text{ kg/h}$
- Množství vody v palivu: $M_{w0} = M_{pv0} \cdot W_0 = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ kg/h}$
- Množství odsušené vody: $\dot{W} = M_{pv0} \cdot \frac{W_0 - W_1}{1 - W_1} = 100 \cdot \frac{0,5 - 0,2}{1 - 0,2} = 37,5 \text{ kg/h}$
- Množství paliva na výstupu: $M_{pv1} = M_{pv0} - M_{\Delta w} = 62,5 \text{ kg/h}$
- Množství vody v palivu na výstupu: $M_{w1} = M_{w0} - M_{\Delta w} = 50 - 37,5 = 12,5 \text{ kg/h}$

Shrnutí výsledků:

Tabulka 3 – Přehled výsledků hmotnostní bilance materiálu

Množství sušiny v palivu na vstupu	M_s	50	kg/h
Množství vody v palivu na vstupu	M_{w0}	50	kg/h
Množství odsušené vody	\dot{W}	37,5	kg/h
Množství paliva na výstupu	M_{pv1}	62,5	kg/h
Množství vody v palivu na výstupu	M_{w1}	12,5	kg/h

5.2 Energetická bilance

5.2.1 Energetická bilance konvektivní sušárny

- Měrná tepelná kapacita vody: $c_{pw} = 4,183 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- Měrná tepelná kapacita sušiny: $c_{ps} = 1,4 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu: $c_a = 1,01 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- Měrná tepelná kapacita vodní páry: $c_v = 1,84 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- Atmosférický tlak: $p = 101325 \text{ Pa}$
- Výparné teplo vody: $I = 2500 \text{ kJ/kg}$
- $M_{H_2O} = 18,02 \text{ g/mol}$
- $M_{vzduch} = 28,96 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
- konstanta $k = \frac{M_{H_2O}}{M_{vzduch}} = 0,6222$

Dle Antoineovy rovnice je určen tlak nasycených par na vstupu a výstupu:

$$p_{Ai}^o = 1000 \cdot \exp\left(16,2886 - \frac{3816,44}{t_{Ai} - 46,13}\right)$$

Na vstupu pro $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $p_{A0}^o = 2313 \text{ Pa}$

Na výstupu pro $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $p_{A1}^o = 12328 \text{ Pa}$

Z nich je určen parciální tlak vodních par:

$$p_{wAi} = \frac{\varphi_i \cdot p_{Ai}^o}{100}$$

Parciální tlak vodních par vstupu – $p_{wA0} = 1157 \text{ Pa}$

Parciální tlak vodních par výstupu – $p_{wA1} = 8629 \text{ Pa}$

Nyní je možno určit měrné vlhkosti:

$$X_{Ai} = k \cdot \frac{p_{wAi}}{p - p_{wAi}}$$

Na vstupu – $X_{A0} = 0,0072 \frac{\text{kg vody}}{\text{kg suchého vzduchu}}$

Na výstupu – $X_{A1} = 0,0579 \frac{\text{kg vody}}{\text{kg suchého vzduchu}}$

Z rovnice pro množství odvedené vody je vyjádřen hmotnostní průtok suchého vzduchu na vstupu:

$$\dot{W} = \dot{M}_A \cdot (X_{A1} - X_{A0}) \rightarrow \dot{M}_A = \frac{\dot{W}}{(X_{A1} - X_{A0})} = 739 \text{ kg/h}$$

Z následující rovnice je vypočtena měrné entalpie na vstupu a výstupu:

$$h_{Ai} = c_A t_{Ai} + X_{Ai}(I + c_v t_{Ai})$$

$$h_{A0} = 38,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{A1} = 200,6 \text{ kJ/kg}$$

Určení rovnice pro výpočet tepelného příkonu sušárny z rovnice pro energetickou bilanci. Je vycházeno z myšlenky Výstup – Vstup = Zdroj

Volím $t_{s1} = t_{dp}$ za podmínek výstupního vzduchu, kdy $t_{s1} = t_{dp} = 43 \text{ °C}$

$$\dot{Q} = \dot{M}_A(h_{A1} - h_{A0}) + t_{s1}(\dot{M}_s \cdot c_{ps} + \dot{M}_{w1} \cdot c_{pw}) - t_{s0}(\dot{M}_s \cdot c_{ps} + \dot{M}_{w0} \cdot c_{pw})$$

$$\dot{Q} = 119561,9 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \rightarrow \dot{Q} = 33,2 \text{ kW} \rightarrow \dot{Q} = 3,19 \text{ MJ/kg odsušené vody}$$

Z následující rovnice je vyjádřena měrná entalpie ohřátého vzduchu za kaloriferem:

$$\dot{Q} = \dot{M}_A(h_{Aohř} - h_{A0}) \rightarrow h_{Aohř} = \frac{\dot{Q} + \dot{M}_A \cdot h_{A0}}{\dot{M}_A} = 200,2 \text{ kJ/kg}$$

Z rovnice pro výpočet entalpie je vyjádřena teplota ohřátého vzduchu:

$$h_{Aohř} = c_A t_{Aohř} + X_{A0}(I + c_v t_{Aohř}) \rightarrow t_{Aohř} = \frac{h_{Aohř} - c_A t_{Aohř}}{c_A + X_{A0} c_v} = 178,1 \text{ °C}$$

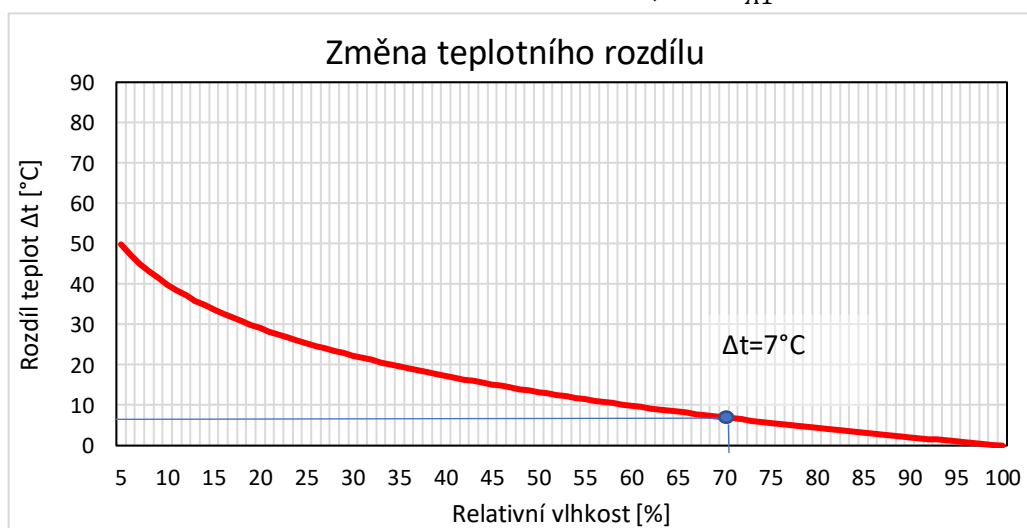
Přehled výsledků:

Tabulka 4 – Přehled výsledků energetické bilance konvektivní sušárny

Měrná vlhkost na vstupu	X_{A0}	0,0072	kg/kg
Měrná vlhkost na výstupu	X_{A1}	0,0579	kg/kg
Hmotnostní průtok suchého vzduchu	\dot{M}_A	739	kg/h
Tepelný příkon	\dot{Q}	33,2	kW
Teplota ohřátého vzduchu v sušárně	$t_{Aohř}$	178,1	°C

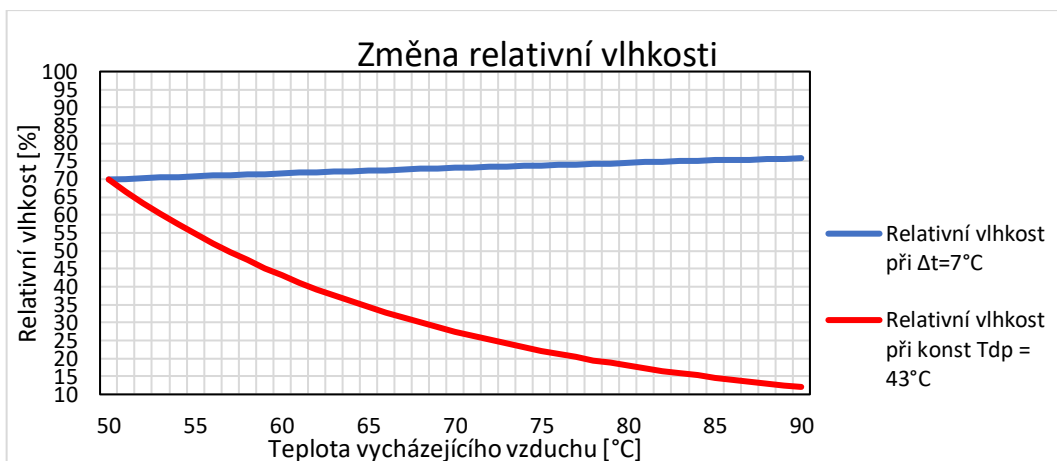
Na následující křivce (Obr. 26) je vidět závislost teplotního rozdílu (teplota na výstupu – teplota rosného bodu na výstupu) na relativní vlhkosti. Také je znázorněn bod, pro který případ bylo počítáno výše. Zadaným parametrem, který se mění je relativní vlhkost, teplota vzduchu na výstupu je konstantní. Tím se mění teplota rosného bodu. Při úplném nasycení (100 %) je teplota vzduchu na výstupu rovna teplotě rosného bodu. V následujících grafech je vidět, že opravdu je snaha se co nejvíce zmenšit tento teplotní rozdíl, avšak to má smysl pouze teoreticky. Rizikem je, že v sušárně dojde ke kondenzaci vody dříve, než vzduch stihne opustit sušárnu, což je nežádoucí. Stanovení rozdílu 7 °C je snaha o zamezení nechtěné kondenzaci. Vychází se z rovnice níže.

$$T_{dp} = \frac{243,04 \cdot \left(\ln \left(\frac{\varphi_1}{100} \right) + \frac{17,625 \cdot t_{A1}}{243,04 + t_{A1}} \right)}{17,625 - \ln \left(\frac{\varphi_1}{100} \right) - \frac{17,625 \cdot t_{A1}}{243,04 + t_{A1}}}$$



Obrázek 26 – Graf závislosti teplotního rozdílu mezi teplotou vzduchu na výstupu a teplotou rosného bodu vzduchu na výstupu na relativní vlhkosti vzduchu na výstupu

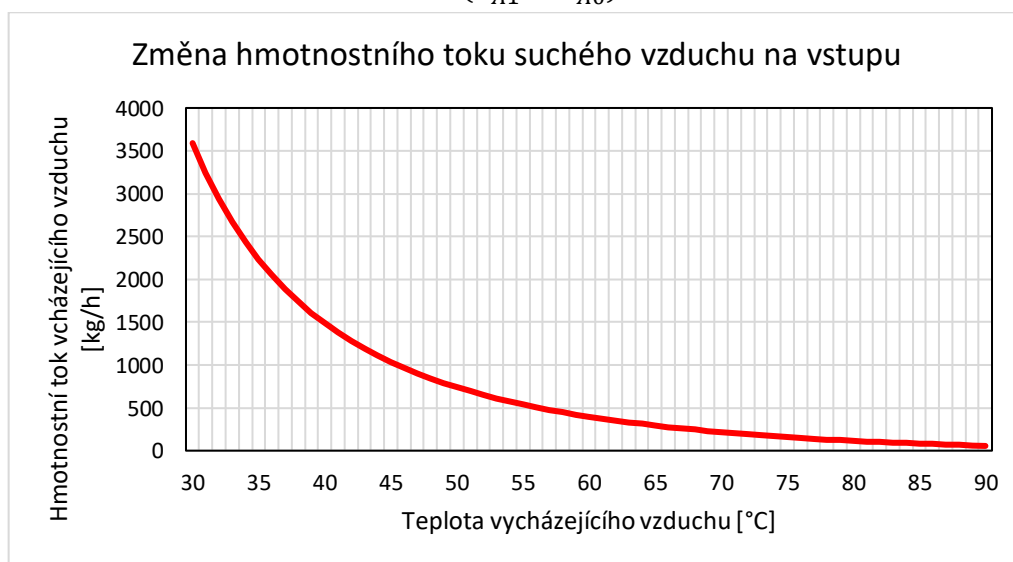
V následujícím grafu (Obr. 27) je vidět závislost relativní vlhkosti na změně zadaného parametru teploty vycházejícího vzduchu. Je vidět, že pokud rozdíl teplot mezi teplotou vycházejícího vzduchu a teplotou rosného bodu je roven 7 °C, relativní vlhkost vzrůstá, tudíž roste nasycení. Pokud je teplota rosného bodu konstantní, nasycení při vzrůstající teplotě klesá. Teplota rosného bodu se počítá za pomoci teploty vzduchu a jejího nasycení, tudíž je možno si upravit rovnici výše tak, abychom měli naopak relativní vlhkost funkcí výstupní teploty a teploty rosného bodu.



Obrázek 27 – Graf změny relativní vlhkosti při dvou podmínkách

V následujícím grafu (Obr. 28) je vidět závislost hmotnostního toku vzduchu na vstupu na vycházející teplotě. Na začátku grafu je vidět, že za malých určených teplot vycházejícího vzduchu je mnohem větší hmotnostní tok vzduchu. Když se však postupně mění zadaná hodnota, které chceme docílit – teplota vystupujícího vzduchu, mění se s tím i teplota rosného bodu, pro kterou byla zvolena podmínka, aby byla vždy o 7 °C nižší, tudíž se opět počítá s $\Delta t=7\text{ °C}$. S tím se však mění relativní vlhkost, a tím pádem nasycení. Se zvyšující teplotou se zvyšuje relativní vlhkost vystupujícího vzduchu, tím se zvedá nasycení a zmenšuje se potřebné množství vzduchu na usušení. Vychází se z rovnice, která je výše už odvozená.

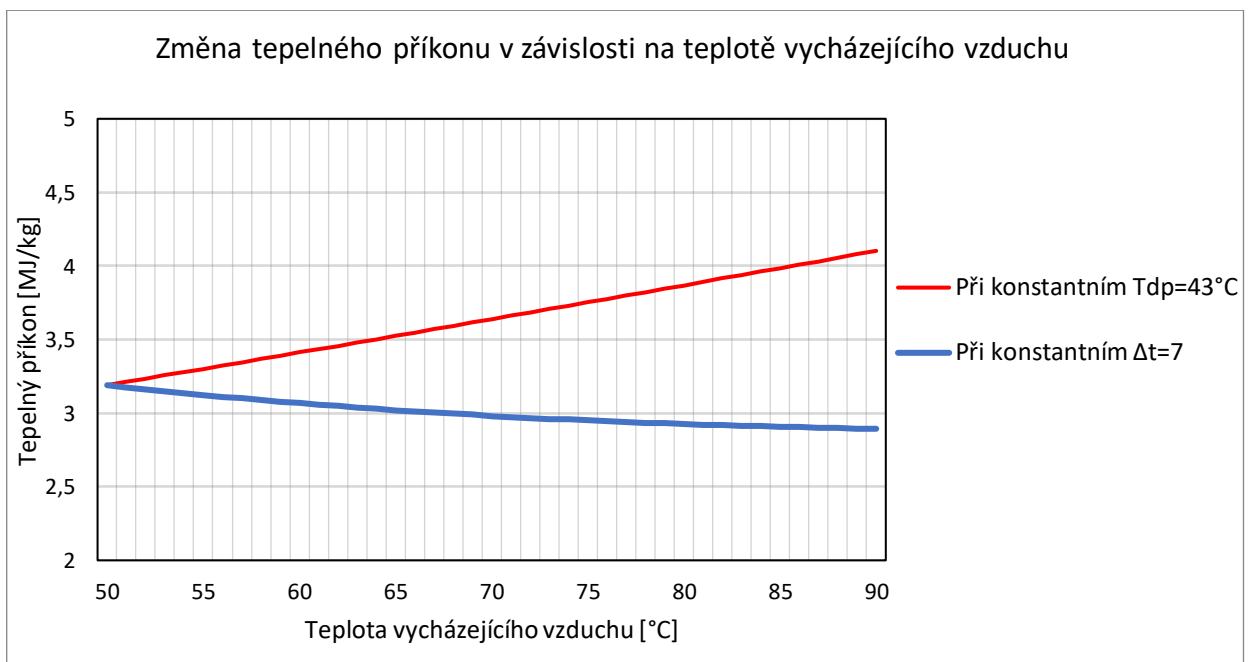
$$\dot{M}_A = \frac{\dot{W}}{(X_{A1} - X_{A0})}$$



Obrázek 28 – Graf změny hmotnostního toku suchého vzduchu na vstupu v závislosti na teplotě vycházejícího vzduchu při $\Delta t=7\text{ °C}$

Se změnou určené teploty vycházejícího vzduchu se taktéž mění potřebný tepelný příkon. V následujícím grafu (Obr. 29) jsou znázorněny dva průběhy tepelných výkonů. Opět se vychází z již odvozené rovnice výše. Podmínkou je zde skutečnost, že teplota rosného bodu vzduchu na výstupu je stejná jako teplota vystupujícího materiálu. Při zvyšování zadaného parametru vystupující teploty vzduchu se opět mění relativní vlhkost vzduchu na výstupu, při konstantním rozdílu teplot 7 °C mezi teplotou vzduchu na výstupu a teplotou rosného bodu relativní vlhkost vzrůstá, při konstantní teplotě rosného bodu 43 °C se relativní vlhkost zmenšuje. Při nižším nasycení vzduchu se musí vynaložit více energie na sušení. Z grafu tedy vyplývá důležitost nasycení procházejícího vzduchu při sušení a její energetické vlastnosti.

$$\dot{Q} = \dot{M}_A(h_{A1} - h_{A0}) + t_{s1}(\dot{M}_s \cdot c_{ps} + \dot{M}_{w1} \cdot c_{pw}) - t_{s0}(\dot{M}_s \cdot c_{ps} + \dot{M}_{w0} \cdot c_{pw})$$



Obrázek 29 – Graf změny tepelného příkonu v závislosti na teplotě vycházejícího vzduchu

5.2.2 Energetická bilance konduktivní sušárny

Volené parametry:

- Teplota paliva na vstupu – $t_{s0} = 20^{\circ}\text{C}$
- Teplota paliva na výstupu – $t_{s1} = 100^{\circ}\text{C}$

Vlastnosti páry, která vyhřívá sušárnu:

- Tlak $p = 4 \text{ bar}$
- Teplota $t_{A0} = 143^{\circ}\text{C}$
- Měrná entalpie páry $h_p = 2738,1 \text{ kJ/kg}$
- Měrná entalpie vody $h_v = 604,7 \text{ kJ/kg}$

Teplo využitě na ohřev materiálu:

$$\dot{Q}_{\text{ohřev}} = \dot{M}_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta T + \dot{M}_w \cdot c_{pw} \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q}_{\text{ohřev}} = 6,2 \text{ kW}$$

Teplo využitě pro vypaření vody:

$$\dot{Q}_{\text{výp}} = W \cdot I$$

$$\dot{Q}_{\text{výp}} = 26,1 \text{ kW}$$

Teoretické potřebné množství tepla:

$$\dot{Q}_{\text{teor}} = \dot{Q}_{\text{ohřev}} + \dot{Q}_{\text{výp}}$$

$$\dot{Q}_{\text{teor}} = 32,3 \text{ kW} \rightarrow \dot{Q}_{\text{teor}} = 3,1 \text{ MJ/kg}_{\text{odsuš.vody}}$$

Potřebné množství páry pro vyhřátí sušárny:

$$\dot{M}_A = \frac{\dot{Q}_{\text{teor}}}{h_p - h_v}$$

$$\dot{M}_A = 54,4 \text{ kg/h}$$

Shrnutí výsledků:

Tabulka 5 – Přehled výsledků energetické bilance konduktivní sušárny

Tepelný příkon využitý na ohřev materiálu	$\dot{Q}_{\text{ohřev}}$	6,2	kW
Tepelný příkon využitý na odpaření vody	$\dot{Q}_{\text{výp}}$	26,1	kW
Celkový tepelný příkon	\dot{Q}_{teor}	32,3	kW
Potřebné množství páry	\dot{M}_A	50,9	kg/h

5.3

5.4 Návrh konvektivní bubnové rotační sušárny

Parametry sušení:

- Objemová intenzita sušení $A_o = 30-80 \text{ kg/m}^3\text{h}$ [40]
- Hustota suchého vzduchu $\rho_v = 1,2 \text{ kg/m}^3$
- Optimální zaplnění sušárny je přibližně 15 % jejího objemu. [40]

5.4.1 Návrh rozměrů konvektivní sušárny

$$V_{min} \geq \frac{\dot{W}}{A_o}$$
$$V_{min} \geq \frac{37,5}{30} = 1,25 \text{ m}^3$$

Toto je minimální potřebný objem pro vysušení materiálu při určených parametrech. Ve zdroji [39] bylo využito 24 metrů dlouhý a 2,2 metrů široký buben, tudíž přibližně 10% průměr z celkové délky. V následujících výpočtech bude počítáno s $d = L \cdot 10\%$

$$V_{min} = \pi \left(\frac{d_{min}}{2} \right)^2 L_{min} \rightarrow L_{min} = \sqrt[3]{\frac{4V_{min}}{0,01\pi}}$$

$$L_{min} \geq 5,42 \text{ m}$$

$$d_{min} \geq 0,54 \text{ m}$$

5.4.2 Výpočet doplňujících parametrů konvektivní sušárny

Již bylo určeno, že optimální zaplnění sušárny je přibližně 15 % jejího objemu, z toho je možno získat kolik kg materiálu se přibližně v sušárně nachází.

Množství materiálu v sušárně:

$$m_{in} = 0,15 \cdot V_{min} \cdot \rho_s = 46,9 \text{ kg}$$

Čas zdržení materiálu v sušárně:

$$\tau = \frac{m_{in}}{M_{pv0}} \cdot 60 = \frac{46,9}{100} \cdot 60 = 28,1 \text{ minut}$$

Rychlost vzduchu procházejícího sušárnou:

$$v = \frac{M_A}{\pi \cdot \left(\frac{d_{min}}{2} \right)^2 \cdot \rho_v \cdot 3600} = \frac{739,06}{\pi \cdot 0,27^2 \cdot 1,2 \cdot 3600} = 0,74 \text{ m/s}$$

Intenzita sušení $A_o=30 \text{ kg/m}^3\text{h}$: – pro tyto hodnoty je vytvořeno schéma

Tabulka 6 – Přehled výsledků rozměrů konvektivní sušárny při $A_o=30 \text{ kg/m}^3\text{h}$

Minimální délka bubnu	L_{min}	5,42	m
Minimální šířka bubnu	d_{min}	0,54	m
Množství materiálu v sušárně	m_{in}	46,9	kg
Čas zdržení materiálu v sušárně	τ	28,1	minut
Rychlost vzduchu v sušárně	v	0,74	m/s

Intenzita sušení $A_o=80 \text{ kg/m}^3\text{h}$ při stejných parametrech:

Tabulka 7 – Přehled výsledků rozměrů konvektivní sušárny při $A_o=80 \text{ kg/m}^3\text{h}$

Minimální délka bubnu	L_{min}	3,91	m
Minimální šířka bubnu	d_{min}	0,39	m
Množství materiálu v sušárně	m_{in}	17,6	kg
Čas zdržení materiálu v sušárně	τ	10,6	minut
Rychlost vzduchu v sušárně	v	1,43	m/s

Při stejných parametrech, při změně intenzity sušení při výpočtu se zmenšily potřebné rozměry bubnu, s tím i doba zdržení materiálu a rychlost sušícího vzduchu.

5.5 Návrh konduktivní bubnové rotační sušárny

Parametry sušení:

- Plošná intenzita sušení $A_p = 2,5 \text{ kg/m}^2\text{h}$ [42]
- Přibližná hustota dřevní štěrky $\rho_s = 250 \text{ kg/m}^3$
- Optimální zaplnění sušárny je přibližně 15 % jejího objemu [40]

5.5.1 Návrh rozměrů konduktivní sušárny

$$S_{min} \geq \frac{\dot{W}}{A_p}$$

$$S_{min} \geq \frac{37,5}{2,5} = 15 \text{ m}^3$$

Toto je minimální potřebná teplosměnná plocha pro vysušení materiálu. V tomto případě bude počítáno s tím, že průměr bubnu je přibližně 15% délky bubnu. $d_{min} = 0,15L_{min}$
Zajímá nás pouze plášť bubnu.

$$S_{min} = \pi d_{min} L_{min} \rightarrow L_{min} = \sqrt{\frac{S_{min}}{0,15\pi}}$$

$$L_{min} \geq 5,64 \text{ m}$$

$$d_{min} \geq 0,85 \text{ m}$$

$$V_{min} = \pi \left(\frac{d_{min}}{2}\right)^2$$

$$V_{min} = \pi \left(\frac{0,85}{2} \right)^2 = 3,17 \text{ m}^3$$

Objem takového válce je 3,17 m³.

5.5.2 Výpočet doplňujících parametrů konduktivní sušárny

Již bylo určeno, že optimální zaplnění sušárny je přibližně 15 % jejího objemu, z toho je možno získat kolik kg materiálu se přibližně v sušárně nachází.

Množství materiálu v sušárně:

$$m_{in} = 0,15 \cdot V_{min} \cdot \rho_s = 119 \text{ kg}$$

Čas zdržení materiálu v sušárně:

$$\tau = \frac{m_{in}}{M_{pv0}} \cdot 60 = \frac{119}{100} \cdot 60 = 71,4 \text{ minut}$$

Tabulka 8 – Přehled výsledků rozměrů konduktivní sušárny

Minimální délka bubnu	L_{min}	5,64	m
Minimální šířka bubnu	d_{min}	0,85	m
Množství materiálu v sušárně	m_{in}	119	kg
Čas zdržení materiálu v sušárně	τ	71,4	minut

5.6 Technologický návrh

5.6.1 Konvektivní

Otop sušárny

Pro konvektivní bubnovou rotační sušárnu byl zadán jako sušící medium vyhřívaný okolní vzduch. Tento vzduch dále předává teplo sušenému materiálu a odvádí vlhkost ven ze sušárny.

Množství potřebného přiváděného suchého vzduchu vyšlo $\dot{M}_A = \frac{W}{(X_{A1} - X_{A0})} = 739,1 \text{ kg/}$

h , rychlost vzduchu v sušárně bude 1,43 m/s

Způsob mísení štěpky v sušárně

Pro návrh byla zvolena možnost využití vestavby v podobě lopatek vestavených v bubnu.

Pohon bubnu

Pohon bubnu je řešen elektromotorem s převodovkou a ozubeným převodem. Buben je uložen na rotujících válcích. [39]

Plnění a vyprazdňování bubnu

Plnění a vyprazdňování bubnu bude řešeno dopravníky či podavači.

5.6.2 Konduktivní

Otop sušárny

Pro konduktivní bubnovou rotační sušárnu byla zadána jako sušící medium pára. Tato pára slouží k ohřátí teplosměnné plochy, kterou tvoří trubky uvnitř sušárny. Plocha předává teplo sušenému materiálu. Dodávání páry do trubek je řešeno rotačním rozvaděčem, stejně tak je řešen odvod kondenzátu. Dodávaná pára bude kondenzovat uvnitř trubek sušárny. [1]

Pro otop je zvolena pára o tlaku 4 bary, což odpovídá teplotě 143 °C

Množství potřebné páry vyšlo $\dot{M}_A = 54,4 \text{ kg/h}$.

Způsob mísení štěpky v sušárně

Pro návrh byla zvolena možnost využití vestavby v bubnu tvořeného z trubek, kterými prochází pára. Zároveň je vhodný pro zvolený typ otopu. Na trubkách jsou vestavěné lopatky. Celková vnitřní geometrie pomáhá mísit dřevní štěpku.

Pohon bubnu

Pohon bubnu je řešen elektromotorem s převodovkou a ozubeným převodem. Buben je uložen na rotujících válcích. [39]

Plnění a vyprazdňování bubnu

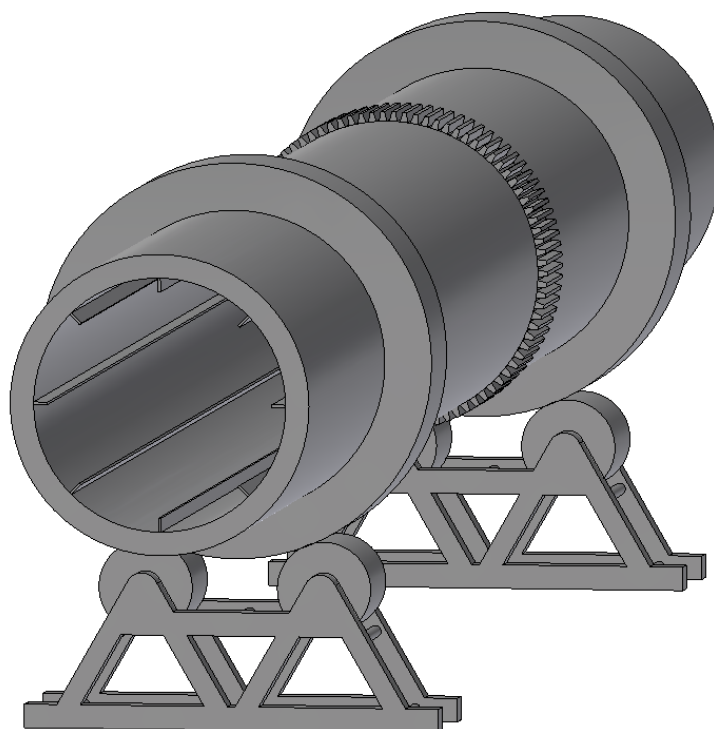
Plnění a vyprazdňování bubnu bude řešeno dopravníky či podavači.

5.7 Schémata sušáren

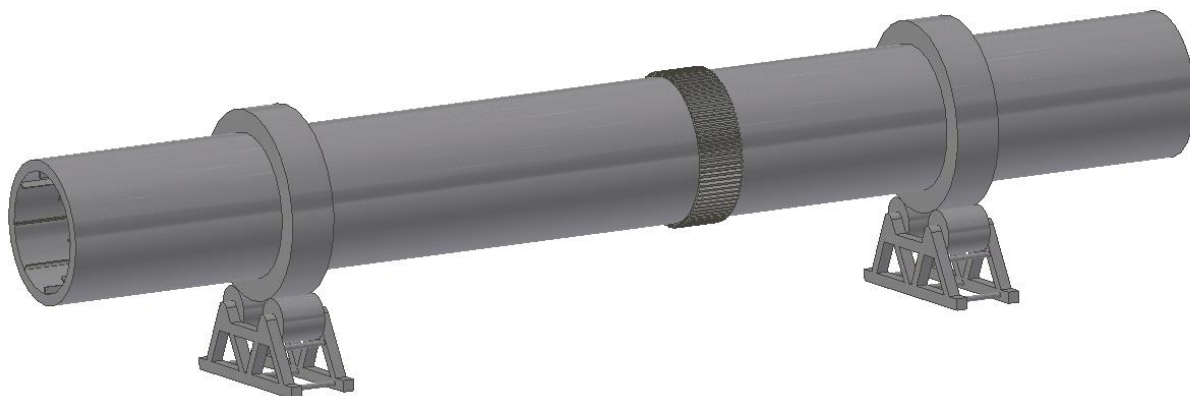
Tabulka 9 – Důležité rozměry bubnů v schématech

Rozměry bubnů	Konvektivní	Konduktivní
Délka bubnu [m]	5,42	5,64
Vnitřní průměr [m]	0,54	0,85

5.7.1 Konvektivní

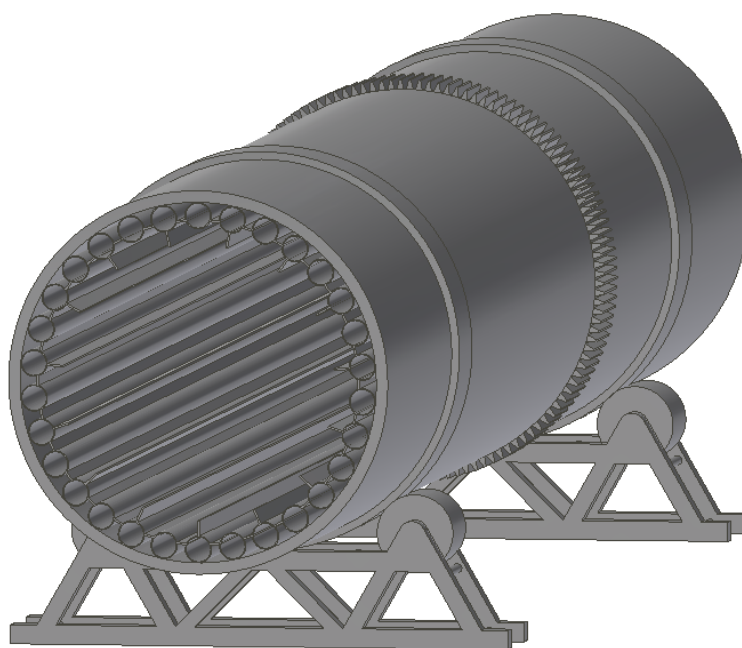


Obrázek 30 – Schéma navrhované konvektivní sušárny

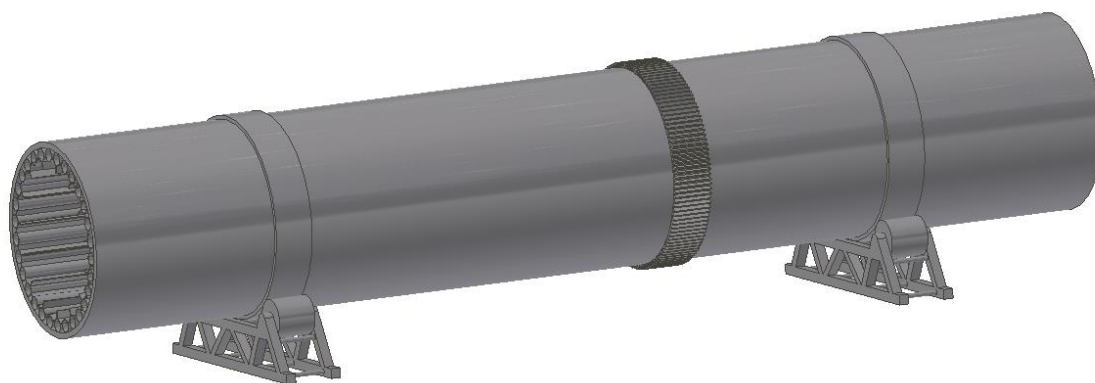


Obrázek 31 – Schéma navrhované konvektivní sušárny

5.7.2 Konduktivní



Obrázek 32 – Schéma navrhované konduktivní sušárny



Obrázek 33 – Schéma navrhované konduktivní sušárny

6 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout sušárnu pro využití odpadní biomasy pro zadané parametry provozu. K tomu, aby mohl být návrh vytvořen bylo nutné zjistit, v čem sušení spočívá. První část práce se zabývala způsoby sušení, jejich parametrů, statikou a kinetikou. Ve statice a kinetice byla popsána hmotnostní a tepelná bilance. Dále práce obsahuje přehled a popis vybraných typů sušáren pro jednodušší výběr vhodného typu sušárny. Taktéž bylo popsáno sušení v různých průmyslových odvětvích a jejich účel.

Návrh sušárny proběhl pro dva typy sušení, a to konvektivní a konduktivní. Pro výpočet bylo zadáno sušení 100 kg/h smrkové dřevní štěpky z 50 % vlhkosti na 30 %. U konvektivní sušárny sušení probíhalo horkým vzduchem, u konduktivní sušení probíhalo přes teplosměnnou plochu vyhřívanou vodní parou.

Jako první byla spočtena hmotnostní bilance materiálu. Dále byly vypočteny tepelné bilance pro konvektivní a konduktivní sušárnu obsahující teoretický tepelný příkon potřebný pro chod sušáren. U konvektivní vyšlo 33,2 kW, u konduktivní vyšlo 32,3 kW. V poměru energie využitě na kilogram odsušené vody u konvektivní vyšlo 3,19 MJ/kg a u konduktivní vyšlo 3,1 MJ/kg. Největší podíl tepelného příkonu tvoří teplo využitě pro vypaření vody. Tepelný příkon u konvektivní sušárny je závislý především na odchozí teplotě a nasycení vzduchu. Při zvětšování nasycení se potřebný tepelný příkon zmenšuje.

Při udržování rozdílu teplot vycházejícího vzduchu a teploty rosného bodu 7 °C, se při zvyšování parametru teploty vycházejícího vzduchu zmenšuje potřebný tepelný příkon na vysušení materiálu. Při konstantní teplotě rosného bodu 43 °C se při zvyšování parametru teploty vycházejícího vzduchu zvyšuje potřebný tepelný příkon.

Pro následující návrh sušárny bylo důležité si zvolit poměr průměru bubnu proti délce bubnu. U konvektivní byl zvolen průměr bubnu 10 % z celkové délky, u konduktivní 15 % z celkové délky. U konvektivní sušárny vychází délka bubnu 5,42 m, průměr 0,54 m, u konduktivní vychází délka bubnu 5,64 m, průměr 0,85 m. Z toho vyplývá, že buben u konduktivní sušárny bude přibližně 2,5x objemnější než buben konduktivní sušárny. Zároveň byla spočtena doba zdržení materiálu v sušárně, která u konvektivní vyšla 28,1 minut oproti konduktivní, kde vyšla 71,4 minut. Z toho vyplývá, že konvektivní vysuší materiál přibližně 2,5x rychleji. Návrh konvektivní sušárny je rozšířen o grafy, které pojednávají o možných změnách ve výpočtu, pokud by se měnil nějaký z parametrů a pojednává o důležitosti rozdílu teplot mezi teplotou rosného bodu vzduchu na výstupu a teplotou vzduchu na výstupu. Návrh sušáren obsahuje také technologický návrh, ve kterém je navržen otop sušárny, způsob mísení štěpky, pohon a plnění bubnu. V konečném návrhu jsou taktéž schémata navržených sušáren vytvořené v CAD programu Autodesk Inventor Professional.

7 Seznam zdrojů

- [1] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03475-5.
- [2] VIKTORIN, Zbyněk. *Vysoušení bytů a staveb postižených povodněmi*. In: Tzb – info [online]. 2002 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/1071-vysouseni-bytu-a-staveb-postizenych-povodnemi>
- [3] *Moist Air – the Mollier Diagram*. In: Engineeringtoolbox [online]. 2003 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html
- [4] GDV – *Container Handbook* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.containerhandbuch.de/chb_e/scha/index.html?chb_e/scha/scha_10_02_05.html
- [5] RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: stroje a zařízení chemického průmyslu: [procesy, stroje a zařízení]*. V Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2012. ISBN 978-80-7414-472-1.
- [6] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-629-6.
- [7] JIROUT, Tomáš, *Přenos tepla III, Sušárny* [online]. [cit. 2023-02-10] Dostupné z: http://users.fsfd.cvut.cz/~jiroutom/ujep_soubory/PP_PT_3.pdf
- [8] PARKIH, Dilip M. *Solids drying: basics and applications*. In: Chemical engineering [online]. 2014 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <http://www.chemengonline.com/solids-drying-basics-andapplications/?printmode=1>
- [9] *Sušení*. In: Laboratorní technika [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>
- [10] GRDZELIŠVILI, Gulnara a HOFFMAN, Pavel. *Sušení rostlinných materiálů* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <http://chps.fsfd.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf>
- [11] STUDÍČKOVÁ, Renata. *Sušení biomasy pro energetické účely*. In: Biom [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suseni-biomasy-pro-energeticke-ucely>
- [12] BALÁŠ, Marek. *Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti*. In: Biom [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/obrazek/graf-zavislosti-vyhrevnosti-biomasy-na-vlhkosti>
- [13] UTĚŠIL, Tomislav. *Suška na biomasu*. In: Biom [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu>
- [14] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. *Sušení Biomasy*. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/13_Zemedelska-technologie_33-34/34_MMP/069_Suseni-biomasy---P1.pdf

- [15] SOUKUPOVÁ, Veronika. *Osmoanabiosa*. In: docplayer. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/45407327-Osmoanabiosa-princip-osmoanabiosy-aktivita-vody-aktivita-vody-aktivita-vody-vodni-aktivita-aktivita-vody.html>
- [16] *Základy Uchování Potravin*. In: UniConsulting. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: http://www.uniconsulting.cz/download/ucebni-text/Zaklady_uchovani_potravin.pdf
- [17] *Rozdělení metod úchovy potravin*. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://ukp.vscht.cz/files/uzel/0007649/0035~~Czg8KyA-9EhvalLe4bUKJakVJfFHeg8vLC4xjndMyswvTgQA.pdf?redirected>
- [18] *Vakuové sušení*. In: Busch. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.buschvacuum.com/cz/cs/applications/drying/>
- [19] *Proces lyofilizace*. In: Busch. [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.buschvacuum.com/cz/cs/news-media/vacuum-preserves-food.html>
- [20] HULÍNSKÝ, Pavel. *Učební text pro obor Truhlář, 1. ročník*. In: Publi. [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/163/06.html>
- [21] *Výroba cihly*. In: Fabriky. [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://www.fabriky.cz/coajak/coajak_cihla.htm
- [22] *How to dry Paint? What technologies are available?* In: Becca. [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://beccainc.com/dry-paint-technologies-available/>
- [23] *Flash dry cuts dry times up to 50%*. In: Becca. [online]. [cit. 2023-02-11] Dostupné z: <https://beccainc.com/flash-dry-cuts-dry-times-50/>
- [24] Rao, Preetham & Gopinath, Ashok. (2013). *Energy Savings in Automotive Paint Ovens: A New Concept of Shroud on the Carriers*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 135. 045001. 10.1115/1.4024537.
- [25] BÜCK, Andreas. *Drying in the Chemical Industry*. In: NWGD. [online]. 2020. [cit. 2023-03-11] Dostupné z: <https://nwgd.nl/kennisbank/drying-in-the-chemical-industry/>
- [26] K GHOSH, Ajit. *Fundamentals of Paper Drying – Theory and Application from Industrial Perspective* [Online]. 2011 [cit. 2023-03-11]. ISBN 978-953-307-583-9. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/19429>
- [27] RONY, Jahanara. *Textile dryer machine and drying process in Textile Industry*. In: Fashion2Apparel. [online]. [cit. 2023-03-11] Dostupné z: <https://fashion2apparel.com/drying-process-in-textile-industry/>
- [28] *Infrared heating and drying for Textiles*. In: Kerone. [online]. 2020. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <http://kerone.com/blog/infrared-heating-and-drying-for-textiles/>
- [29] CHOUDHARY, Ankur. *Principle, construction, working, uses, merits and demerits of Tray dryer*. In: Pharmaguideline. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.pharmaguideline.com/2007/02/principle-construction-working-uses-merits-demerits-of-tray-dryer.html>
- [30] SINGH, Banti. *What is industrial Rotary Dryer*. In: Chemicals Learning. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.chemicalslearning.com/2022/09/industrial-rotary-dryer-rotary-dryer.html>

- [31] CHOUDHARY, Ankur. *Principle, construction, working, uses, merits and demerits of Drum dryer*. In: Pharmaguideline. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.pharmaguideline.com/2007/02/principle-construction-working-use-merits-demerits-of-drum-dryer.html>
- [32] *Fluid Bed Dryer*. In: SaintyCo. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.saintytec.com/advantages-and-disadvantages-of-fluid-bed-dryer/>
- [33] *Spray dryer*. In: Unackdry. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: http://www.unackdry.com/e_news_show/?id=16
- [34] ANDREWS, Natalie. *Advantages and Disadvantages of Spray Drying*. In: OurPastimes. [online]. 2017. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://ourpastimes.com/advantages-disadvantages-spray-drying-8666922.html>
- [35] Orsat, Valérie & Changrue, Viboon & Raghavan, Vijaya. (2006). *Microwave drying of fruits and vegetables*. Stewart Postharvest Review. 2. 1-7. 10.2212/spr.2006.6.4.
- [36] *History of Drum Drying*. In: DrumDryingResources. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://drum dryingresources.com/history-of-drum-drying>
- [37] *Microwave drying of fruits and vegetables* – In: ResearchGate. [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-limitations-of-microwave-drying-22_tbl1_233657717
- [38] Mujumdar, A. S. (2001). *Industrial Drying Technologies: Current Status and Future Trends*. *Energy and Environment*, 112–125. doi:10.1007/978-4-431-68325-4_5
- [39] *Rotary dryer design calculation for wood chips* – In: Biopelletmachines. [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.biopelletmachines.com/rotary-dryer-design-and-calculation/>
- [40] Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying (3rd ed.)*, CRC Press, doi:10.1201/9781420017618
- [41] Pavel, 2023. *Obrázek smrkové dřevní štěpky*. In: Bazoš [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://dum.bazos.cz/inzerat/168578105/smrkova-stepka.php>
- [42] Havlík J, Dlouhý T, Pitel' J. (2022) *Drying Biomass with a High Water Content – The Influence of the Final Degree of Drying on the Sizing of Indirect Dryers*. *Processes*. 10(4):739. <https://doi.org/10.3390/pr10040739>
- [43] STRUPAVSKÝ, Vladimír. *Moderní využití energie ze dřeva*. In: Tzb – info [online]. 2014 [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/11169-moderni-vyuziti-energie-ze-dreva>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Sorpční izoterma [4]	11
Obrázek 2 – Mollierův h-X diagram [3]	12
Obrázek 3 – Bilance sušárny [10]	12
Obrázek 4 – Časový průběh teploty, rychlosti sušení a vlhkosti [2]	13
Obrázek 5 – Schéma sušení z povrchu (a) a z objemu (b) [5]	14
Obrázek 6 – Schéma nepřímého konduktivního sušení [5]	14
Obrázek 7 – Schéma komorové sušárny [5]	16
Obrázek 8 – Schéma pásové sušárny [5]	16
Obrázek 9 – Schéma rotační bubnové sušárny [6]	17
Obrázek 10 – Schéma fluidní sušárny [5]	18
Obrázek 11 – Schéma proudové sušárny [5]	18
Obrázek 12 – Schéma rozprašovací sušárny [6]	19
Obrázek 13 – Schéma válcové sušárny [1]	20
Obrázek 14 – Schéma lopatkové sušárny [6]	20
Obrázek 15 – Schéma Krauss Maffei - kontinuální talířové sublimační sušárny [1]	21
Obrázek 16 – Schéma sušárny s infračerveným ohřevem [1]	22
Obrázek 17 – Schéma sušárny s dielektrickým ohřevem [1]	22
Obrázek 18 – Schéma mikrovlnné sušárny [1]	23
Obrázek 19 – Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti [12]	26
Obrázek 20 – Vliv teploty na projevy mikroorganismů [17]	28
Obrázek 21 – Využití energie v automobilovém výrobním procesu [24]	30
Obrázek 22 – Schéma výroby papíru [26]	31
Obrázek 23 – Schéma sušičky textilů [27]	32
Obrázek 24 – Roční spotřeba energie na sušení v různých odvětvích v Nizozemsku, celkem 240 PJ [25]	33
Obrázek 25 – Smrková dřevní štěpka [41]	36
Obrázek 26 – Graf závislosti teplotního rozdílu mezi teplotou vzduchu na výstupu a teplotou rosného bodu vzduchu na výstupu na relativní vlhkosti vzduchu na výstupu	39
Obrázek 27 – Graf změny relativní vlhkosti při dvou podmínkách	40
Obrázek 28 – Graf změny hmotnostního toku suchého vzduchu na výstupu v závislosti na teplotě vycházejícího vzduchu při $\Delta t = 7 \text{ }^\circ\text{C}$	40
Obrázek 29 – Graf změny tepelného příkonu v závislosti na teplotě vycházejícího vzduchu	41
Obrázek 30 – Schéma navrhované konvektivní sušárny	47
Obrázek 31 – Schéma navrhované konvektivní sušárny	47
Obrázek 32 – Schéma navrhované konduktivní sušárny	48
Obrázek 33 – Schéma navrhované konduktivní sušárny	48

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Porovnání sušáren [1]	24
Tabulka 2 – Srovnání sušáren dle výhod a nevýhod	25
Tabulka 3 – Přehled výsledků hmotnostní bilance materiálu	37
Tabulka 4 – Přehled výsledků energetické bilance konvektivní sušárny	39
Tabulka 5 – Přehled výsledků energetické bilance konduktivní sušárny	42
Tabulka 6 – Přehled výsledků rozměrů konvektivní sušárny při $A_0=30 \text{ kg/m}^3\text{h}$	44
Tabulka 7 – Přehled výsledků rozměrů konvektivní sušárny při $A_0=80 \text{ kg/m}^3\text{h}$	44
Tabulka 8 – Přehled výsledků rozměrů konduktivní sušárny	45
Tabulka 9 – Důležité rozměry bubnů v schématech	46