



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

SUŠENÍ BIOMASY

BIOMASS DRYING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Kroupa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017



Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Zdeněk Kroupa
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Sušení biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Biomasa využívaná pro energetické účely je pro svoji vysokou vlhkost často nevhodná pro spalování či další energetické využití.

Práce se bude zabývat principy sušení tuhých látek a rešerší technologií, které se v současné době pro sušení biomasy využívají. V závěru práce pak bude provedeno bilanční porovnání vybraných typů sušáren.

Cíle bakalářské práce:

- principy sušení tuhých látek
- rešerše technologií sušení biomasy včetně vzájemného porovnání
- provedení bilančních výpočtů vybraných sušáren
- vyhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

AVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-2-4-4300-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

MALÁŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá sušením biomasy a bilančním výpočtem zadané sušícího zařízení.

Úkolem je **vypočítat množství spalin potřebných k vysušení 170 kg fermentu o vlhkosti 50 % na vlhkost 15 %.**

Klíčová slova

Sušení, sušárna, biomasa, vlhkost, palivo, energie, bilanční výpočet

Abstract

The bachelor thesis deals with drying of biomass and balance calculation of specified drying equipment.

The task is **to calculate the amount of flue gas needed to dry 170 kg of ferment with a moisture content of 50 % to 15 %.**

Keywords

Drying, dryer, biomass, moistness, fuel, energy, balance calculation

Bibliografická citace

KROUPA, Z. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Sušení biomasy vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

12. 5. 2017

.....

Podpis

Vysoké učení v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Energetický ústav

Energetika, procesy a životní prostředí
Sušení biomasy
Zdeněk Kroupa

Poděkování

Tímto bych chtěl **poděkovat doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D.** za poskytnutí odborných rad a materiálů k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod	9
2. Proč sušit biomasu	10
3. Princip sušení tuhých látek	10
4. Rozdělení sušáren	12
4.1 Podle druhu použitého sušícího média	12
4.2 Podle provozního tlaku	13
4.3 Podle způsobu proudění sušícího média.....	13
4.4 Podle pohybu materiálu	13
4.5 Podle povahy provozu	13
4.6 Podle převládajícího způsobu sdílení tepla	13
5. Vybrané druhy technologií sušáren	14
5.1 Rotační bubnová sušárna	14
5.2 Lopatková sušárna.....	16
5.3 Sušárna s dielektrickým ohřevem	16
5.4 Rozprašovací sušárna	17
5.5 Fluidní sušárna	18
5.6 Impaktní sušárna	19
5.7 Sublimační sušárna.....	19
5.8 Sušárna s infračerveným zářením	20
5.9 Mikrovlnná sušárna	21
6. Bilanční výpočet sušárny	23
6.1 Bilance materiálu k sušení.....	23
6.2 Tepelná bilance sušárny	25
6.3 Bilanční výpočty objemů a vlhkosti	28
6.4 Výpočet rozměrů bubnu sušárny	31
7. Závěr	32

1. Úvod

V dnešní době se s rostoucí energetickou spotřebou na obyvatele, mění také myšlení lidí ohledně **vyšší potřeby obnovování zdrojů energie**. Pokud se mluví o obnovitelnosti daného zdroje, uvažuje se časový horizont jednoho lidského života. Suroviny jako ropu, zemní plyn a další jsou řazeny mezi neobnovitelné zdroje. Ty jsou svým způsobem obnovitelné, jen v delším časovém měřítku.

Tendence tedy směřují k ústupu **od používání primárních neobnovitelných zdrojů ke zdrojům obnovitelným**, mezi které patří sluneční záření, větrná energie, geotermální energie, vodní energie, biomasa a další.

Dalo by se také říci, že **biomasa je jistou formou uložení energie** sluneční a nepřímo i větrné. Pokud je větrná síla použita k rozmnožení rostlin.

Jedním z **problémů u použití biomasy k výrobě energie**, kterou můžeme následně transformovat do nejrůznějších forem, **je vysoký obsah vody** v dané flóře.

Vlhkost je obsah vody v biomase a **je základním měřítkem při volbě biomasy** do spalovacích procesů. **Vlhkosti se zbavujeme nejrůznějšími technologiemi sušení**, o kterých bude pojednávat tato bakalářská práce. Nejzákladnější rozdělení sušících procesů je **samovolné (pasivní)** sušení, které je ovšem časově náročnější, dalším způsobem je sušení **za pomoci energie (aktivní)** nebo se oba procesy mohou **kombinovat**.

Nejčastější používané formy biomasy jsou **dřevo, kůra, sláma nebo rostliny záměrně pěstované** ke spálení nebo na výrobu pohonných hmot.

Biomasa je často sušena a následně upravována **do formy pelet nebo briket**. Ty mohou mít tvar dutých nebo plných válců, kostek apod. Je to slisovaná dřevní hmota o velikosti v řádech milimetrů až desítek milimetrů.

2. Proč sušit biomasu

Před samotným spalováním biomasy je důležité odstranit její vlhkost. Pokud není vlhkost odstraněna, je zapotřebí dodat další nezanedbatelné množství energie na odpaření vody z daného paliva v tomto případě biomasy. **Voda snižuje energetickou účinnost daného paliva.** Pokud má vybraná biomasa vlhkost 15 % její výhřevnost se pohybuje kolem čísla 14 MJ/kg, ovšem pokud ji důkladně vysušíme, můžeme se dostat na úroveň výhřevnosti uhlí, která se u hnědého uvádí kolem 17 MJ/kg a u černého uhlí dokonce 25-30 MJ/kg. Čísla zde uvedená nejsou přesná, mají pouze demonstrovat důležitost sušení.

Pokud ovšem bude energie vynaložená na sušení v sušícím zařízení stejná, jako energie spotřebovaná na odpaření vody z biomasy při samotném spalovacím procesu a nedojde při spalovacím procesu k nechtěným jevům v podobě nezahoření paliva nebo výraznému klesání teplot ve spalovacím zařízení. Pak je určitě na místě zvážit, jestli je sušení zapotřebí.

Z inženýrského hlediska je také **důležité si uvědomit, nejen daný konkrétní energetický zisk energie při spálení dané dřeviny nebo rostliny, ale i energii vynaloženou na její zasetí, pěstování, sklizeň a následnou přepravu.** Z tohoto pohledu je tedy nutné zvážit, jak moc energeticky výhodná a ekologická je daná výroba energie. V jistém velmi vzdáleném směru, při uvážení neekonomických dotací EU na pěstování biomasy, můžeme tuto výrobu srovnat s výrobou energie pomocí přečerpávacích elektráren, které přečerpávají vodu v době mimo špičku za nižších cen elektřiny a následně pomáhají pokrýt spotřebu ve špičce. Tyto elektrárny mají tedy v podstatě funkci kondenzátoru energie.

V některých provozech, **není primárním cílem sušení, dosáhnout určitého snížení měrné vlhkosti, ale snížit aktivitu vody.** To má význam z hlediska konzervace potravin, protože nízká aktivita vody brání růstu mikroorganismů.

3. Princip sušení tuhých látek

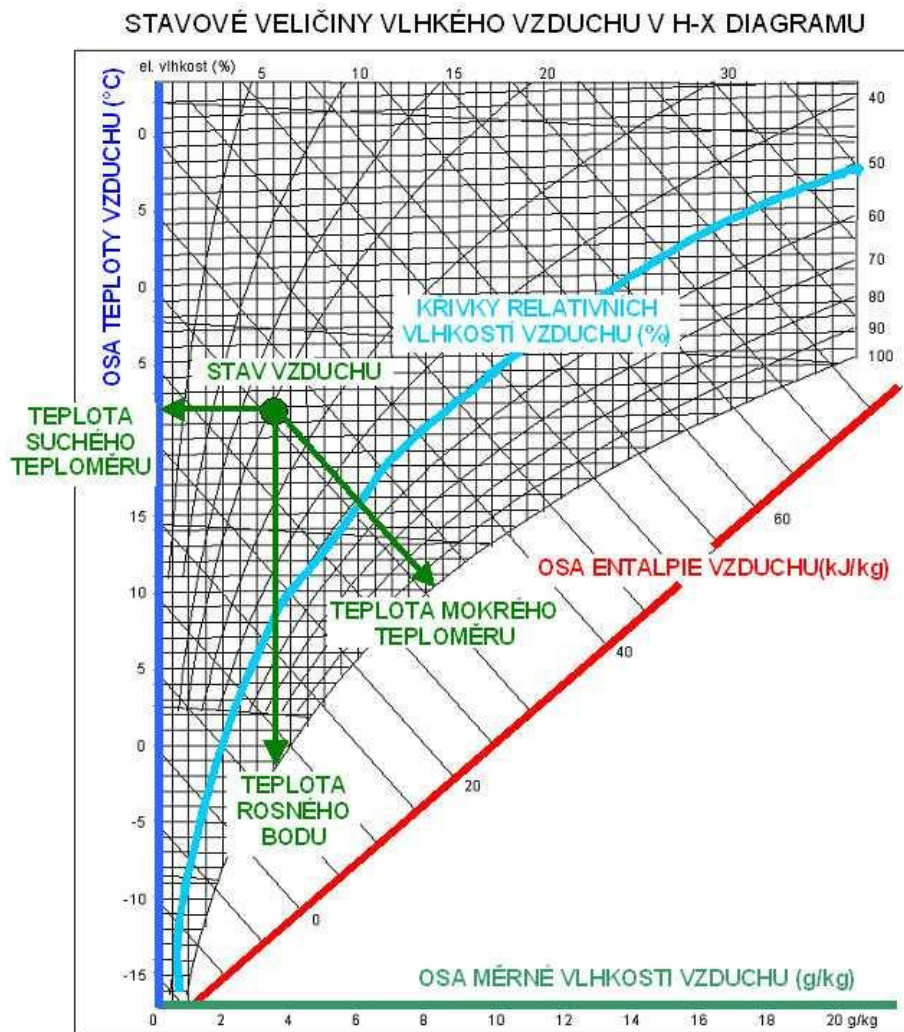
Sušení je fyzikálně-chemický proces, při kterém se z dané látky odstraňuje nechtěná kapalina, nejčastěji voda. Tento proces probíhá přivedením tepla potřebného k ohřátí kapaliny do varu a jejího následného odpaření z materiálu. energii spotřebovává také sušina, protože se při procesu souběžně zahřívá.

Sušení může probíhat působením Slunce, ale také celou řadou nejrůznějších technologií, které jsou popsány v následujících kapitolách. Voda je v palivech nechtěná příměs a může způsobovat nežádoucí chemické reakce. **Odstraňuje se odparky, použitím sušárny, mechanicky, osmoticky, samovolně.**

Důležité je také zmínit fakt, že **sušící média mohou dosáhnout maximálního nasycení vodou**. To je kolik jsou schopny reálně pojmout vody. Tyto závislosti jsou popsány v h-x diagramech. V případě zadání této práce na výpočet vybrané sušárny se procentuální zastoupení vody v sušícím médiu téměř vůbec nezmění, proto je to zanedbatelné. Ovšem pro jiná zadání sušáren by mohlo být potřeba zvětšit objem spalin.

Sušení z hlediska obsahu vlhkosti v závislosti na čase má svoje rychlostní fáze. Dá se říci, že **čím se obsah vlhkosti blíží k rovnovážnému stavu vlhkosti, tím je sušení pomalejší**. Vše je názorně vidět na obrázku číslo jedna, kde je vidět graf závislosti obsahu vlhkosti na čase.

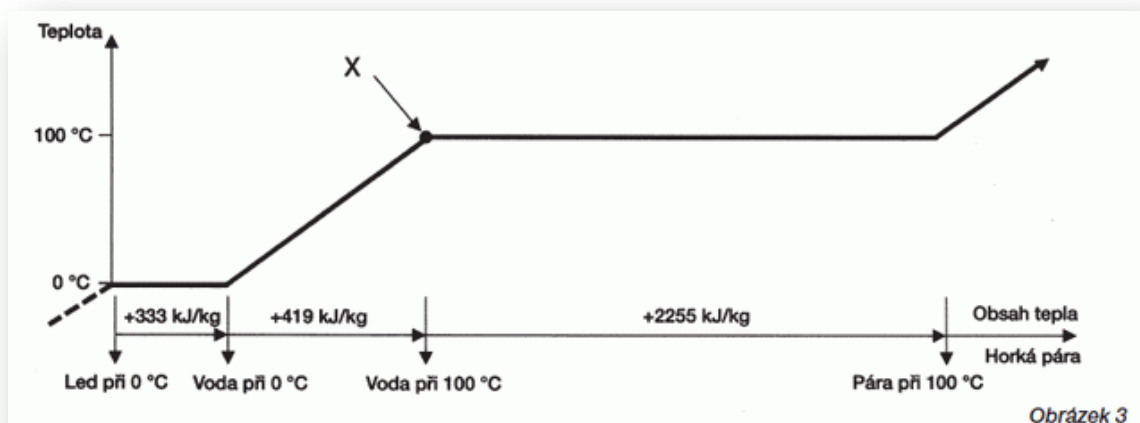
Množství energie potřebné na odstranění vody z materiálu je závislé na formě vazby vody na kostru. Při lisování například potřebujeme šestnáctsetkrát méně vody než u některých sublimačních sušáren.



Obrázek 1 Diagram stavových veličin vlhkého vzduchu v h-x diagramu [22]



Obrázek 2 Graf závislosti obsahu vlhkosti na čase[18]



Obrázek 3 Graf ohřevu vody, závislost teploty na dodaném teple[19]

4. Rozdělení sušáren

Sušící zařízení můžeme rozdělovat podle celé řady kritérií.

4.1 Podle druhu použitého sušícího média

- sušení **vzduchem** - teplovzdušná sušárna
- sušení **spalinami** - spalinová sušárna
- sušení **inertním plynem** - inertní sušárna

- sušení **přehřátou párou** - sušárna s přehřátou párou

4.2 Podle provozního tlaku

- sušení **zaatmosférického tlaku** - atmosférická sušárna, sušení za stálého atmosférického tlaku
- sušárna **sestálým tlakem**
- sušení **za pulzujícího atmosférického tlaku** - pulzační sušárna
- sušení **za vakua** - vakuová sušárna
- sušení **za přetlaku** - přetlaková sušárna

4.3 Podle způsobu proudění sušícího média

- sušení **ofukováním** - sušící medium proudí podél materiálu za existence mezní vrstvy.
- sušení **profukováním** - sušící medium proudí vrstvou sušeného materiálu.
- sušení **impaktní** - sušící medium proudí kolmo na povrch sušeného materiálu - mezní vrstva se rozruší.
- **v proudu** - sušený materiál je proudem sušícího média unášen nebo přibrzdován a je jím zcela omýván.
- sušení **fluidní** - sušený materiál se vznáší v proudu sušícího média.

4.4 Podle pohybu materiálu

- sušený materiál je při sušení **v klidu nebo občasném pohybu** (roštová sušárna, skříňová sušárna)
- zdrojem pohybu sušeného materiálu je jeho **potenciální energie** (sesypná sušárna)
- zdrojem pohybu sušeného materiálu je hlavně **kinetická energie sušícího média** (proudová sušárna, fluidní sušárna, rozprašovací sušárna)
- s **mechanickým pohybem** (pohyb sušeného materiálu zajišťuje mechanické dopravní zařízení):
- **lineární pohyb** (sušárna pásová, válečková, řetězová, šneková, vibrační, hrabadlová)
- **rotační pohyb** (pohyb sušeného materiálu zajišťuje otáčení sušícího prostoru: kontaktní - sušárna talířová, válcová; konvekční – bubnová, trubková)

4.5 Podle povahy provozu

- sušení **periodické** - periodická sušárna
- sušení **kontinuální** - kontinuální sušárna“ [10]

4.6 Podle převládajícího způsobu sdílení tepla

- **konvekční** sušení (nepřímé) – Přenos tepla u takových sušáren obstarává sušící prostředí vzduch nebo spaliny. Konvektivní sušení používá impaktní sušárna, proudová sušárna, rozprašovací sušárna, šachtová gravitační sušárna, bubnová sušárna, fluidní sušárna, apod.

- **kontaktní** sušení (přímé) – Přenos tepla je napřímo sušící materiál a vyhřívaná plocha. Kontaktní sušení používá válcová sušárna, bubnová sušárna, lopatková sušárna, sublimační sušárna.
- **radiační** sušení – sušárna s infračerveným ohřevem, dielektrická sušárna, mikrovlnná sušárna, ultrazvuková sušárna

[10], [21]

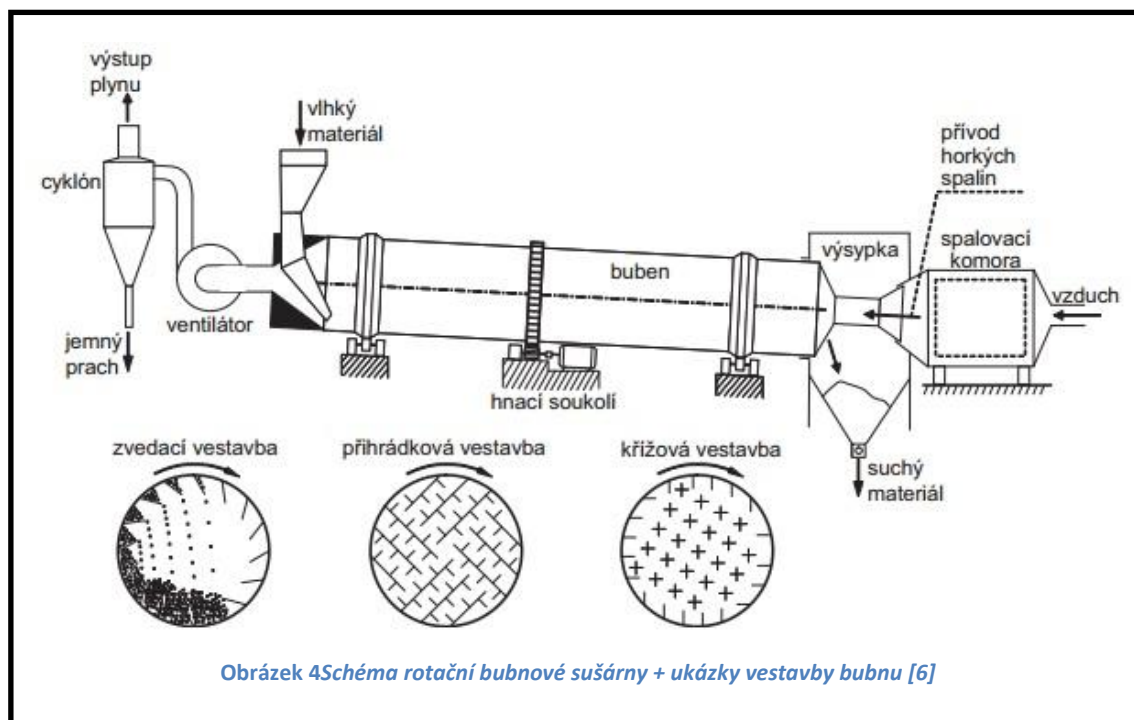
5. Vybrané druhy technologií sušáren

Zařízení, které by zastalovšechny sušící procesy, bychom hledali jenom těžko. Musíme tedy využívat mnoha typů sušících zařízení. Vzhledem k tomu, že sušáren je opravdu velké množství, nejsou zde uvedeny všechny, ale **jen ty nejdůležitější.**

5.1 Rotační bubnová sušárna

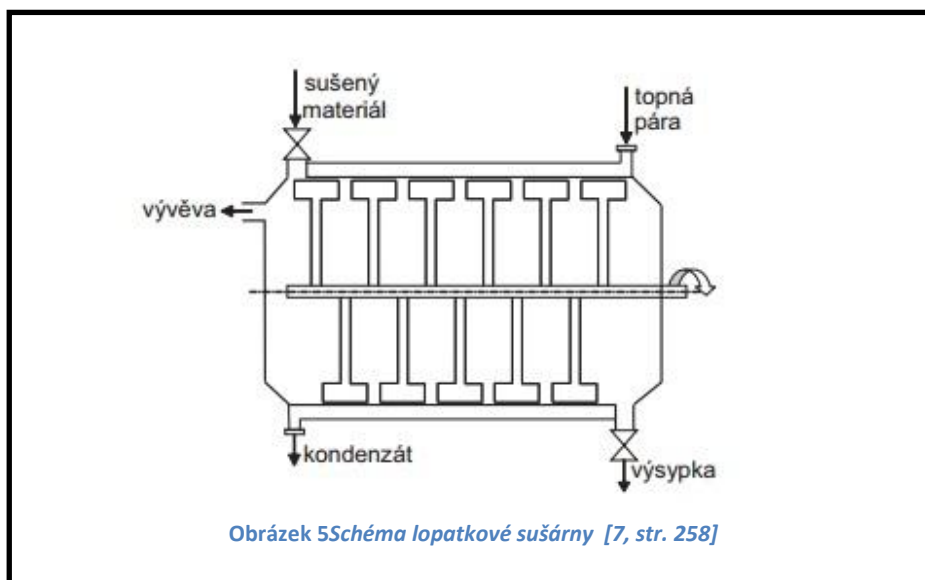
Jedná se o **kontinuální zařízení, jehož hlavní součástí je buben otáčející se na ozubeném kole. Buben je uložen s mírným náklonem v horizontálním směru.** Díky nahnutí sušený materiál postupně sklouzává skrz buben a na konci vypadne ve výsypce. Také je rotací přesypáván za stálého kontaktu se sušícím médiem, plynem. Ten proudí u většiny sušáren tohoto typu protiproudem, to znamená, že **směr proudění sušeného materiálu je opačný se směrem proudění sušícího plynu,** jen **občas souproudě** a tvoří ho spaliny ze spalovací komory, která se nachází u vstupu sušárny. **Vestavba uvnitř bubnu** zvětšuje plochu kontaktu bubnu se sušeným prvkem a tím **zvyšuje efektivnost sušení.**

Takový typ sušáren je využíván pro polydisperzní **materiály a částice o velikosti 0,1 až 100 μm .** Například **dřevěných pilin, chemikálií, keramických materiálů nebo masa.** **V domácnosti** se je možné s obdobou rotační bubnové sušárny setkat **v podobě sušiček prádla.** Spotřeba **tepla na ohřátí jednoho kilogramu** sušeného materiálu se pohybuje v rozmezí **4 MJ až 8 MJ.** [21, str. 148] [2, str. 259]



5.2 Lopatková sušárna

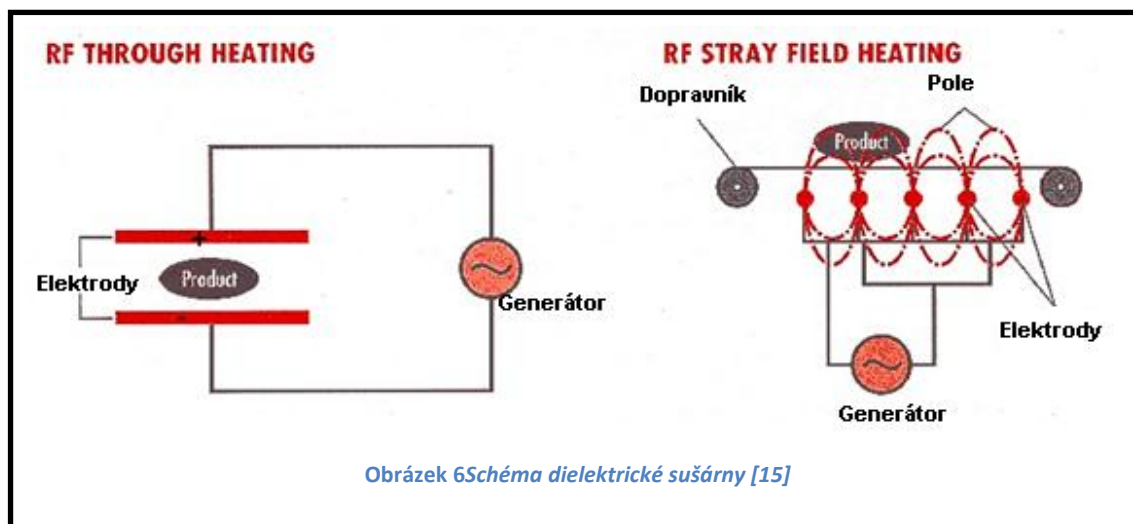
Uvnitř vyhřívaného bubnu sušárny se nachází lopatky, které promíchávají sušící médium a sušenou biomasu nebo jiné prvky. Sušárna pracuje **na principu vakua** a je vhodná na sušení **obtížně míchatelných materiálů a dosušování materiálů**. Např.: **celulóza, škrob, také barva, práškové kovy**. Spotřeba tepla je v rozmezí



2,9 MJ až 4,2 MJ na kilogram materiálu a pro dosušování dokonce 10 MJ na kilogram. [21, str. 150], [3, str. 258], [4]

5.3 Sušárna s dielektrickým ohřevem

Voda je polární látkou, **princip z fyzikálního hlediska využívá polarizace**. Molekuly vody se natáčejí s měnícím se elektrickým polem. Používá se pro sušení **dřeva, plastů, papíru, potravin náchylných na vyšší teploty**. Tato technologie sušení je **značně rychlejší než u tepelného sušení**. Čas uváděn výrobci těchto zařízení se pohybuje kolem **3 - 40 hodin u dielektrického a 150 - 500 hodin u tepelného**. Spotřeba tepla u sušáren tohoto typu se pohybuje někde kolem **3 MJ na kilogram**. [21, str. 152]



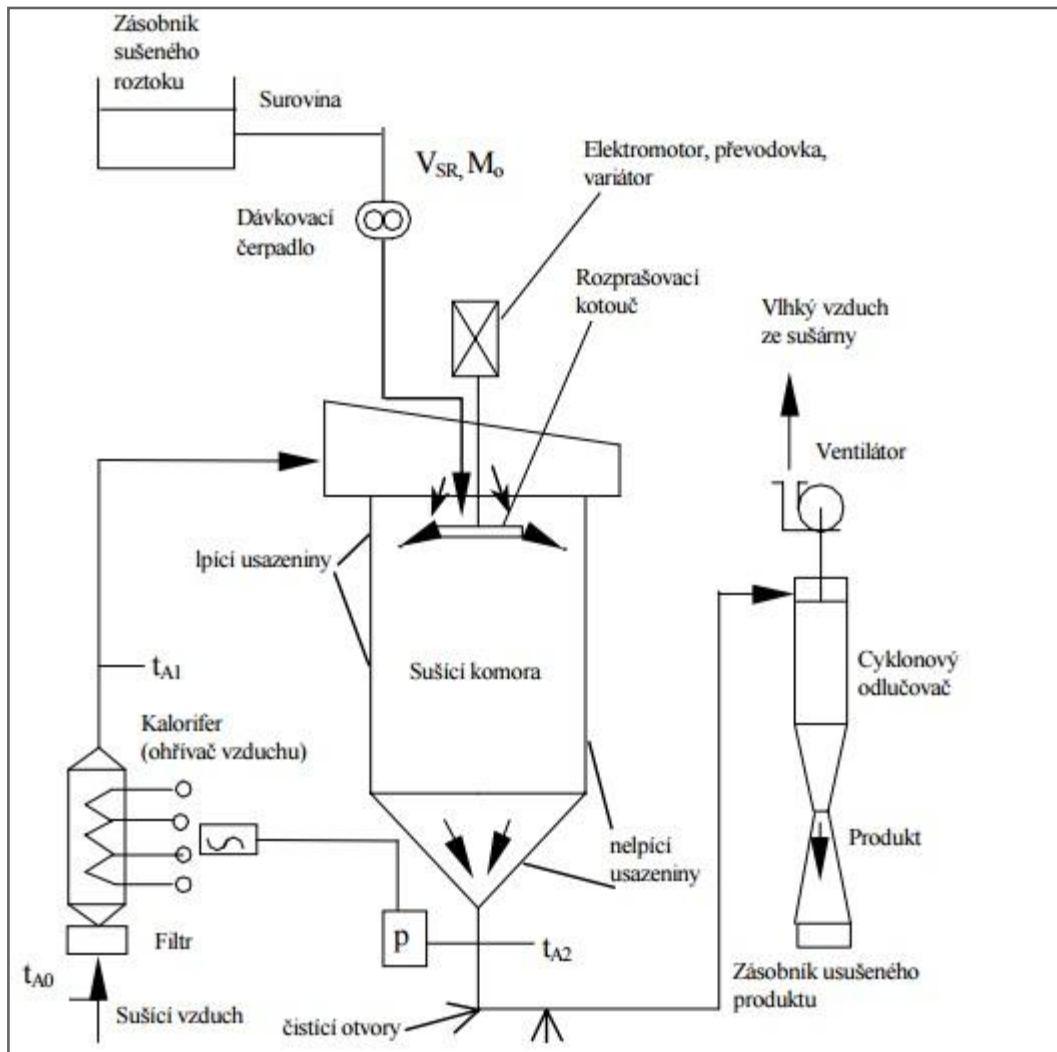
5.4 Rozprašovací sušárna

Principem sušení rozprašovací sušárny je **transformovat kapaliny na suchý prášek** při jednom jediném sušicím procesu.

„Kapalina je **desintegrována na malé kapičky pomocí rotačního kotouče nebo trysky**, kapičky přicházejí do styku s horkým sušicím médiem, při výrobě potravin výhradně se vzduchem. Následuje **velmi rychlé vypaření vody z povrchu**, ten má během vypařování poměrně nízkou teplotu odpovídající teplotě mokrého teploměru. To umožňuje použít vzduch o vysoké teplotě i pro sušení termolabilních potravinářských a jiných materiálů.

Ke zvýšení teploty povrchu částice dochází až v závěrečné fázi sušení, kdy povrch není zcela omočen a kdy se kapka změnila v téměř suchou částici. V této fázi je však citlivost materiálu podstatně nižší. **Doba sušení dispergované kapaliny je ve srovnání s jinými způsoby sušení velice krátká, obvykle několik sekund.** Za tak krátkou dobu nestačí dojít ke znehodnocení sušeného materiálu, což vysvětluje oblibu **rozprašovacího sušení v potravinářském průmyslu**. Po usušení se suché částice oddělují od sušícího média a dále zpracovávají.“[9]

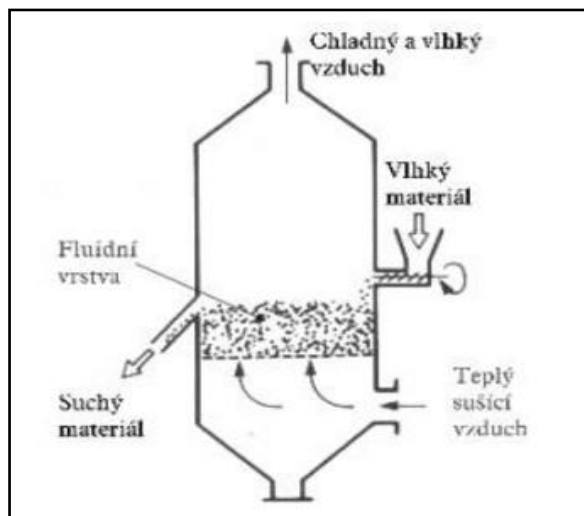
Takto se suší například sušené **mléko, instantní káva, čaj, kakao, prací prášky, vejce, zmrzlinové směsi, barviva, plasty (PVC), léčiva**. Spotřeba tepla je **4,6 až 11 MJ na kilogram**. [21, str. 149]



Obrázek 7 Schéma rozprašovací sušárny [8, str. 2]

5.5 Fluidní sušárna

U tohoto typu sušáren existuje **velké množství konfigurací** podle fluidní vrstvy a jejího uspořádání. Existují **jednostupňové a mnohostupňové**, využívají se **pro pastovité nebo monodisperzní materiály**, což jsou materiály, u kterých **není příliš velký rozsah velikosti částic**. Sušící médium zde bývá vzduch nebo spaliny. Také je zde možno použít cyklické chlazení a ohřev. Vyznačuje se **nízkými tlakovými ztrátami a malou energetickou náročností**. Odpaří přibližně **100 kg vody za hodinu při spotřebě 2900 – 4200 kJ / kg**. [1, str. 30] Nejčastěji se používají pro **sušení obilovin, chemikálií a krystalového cukru, ovoce, zeleniny, glukózy**.



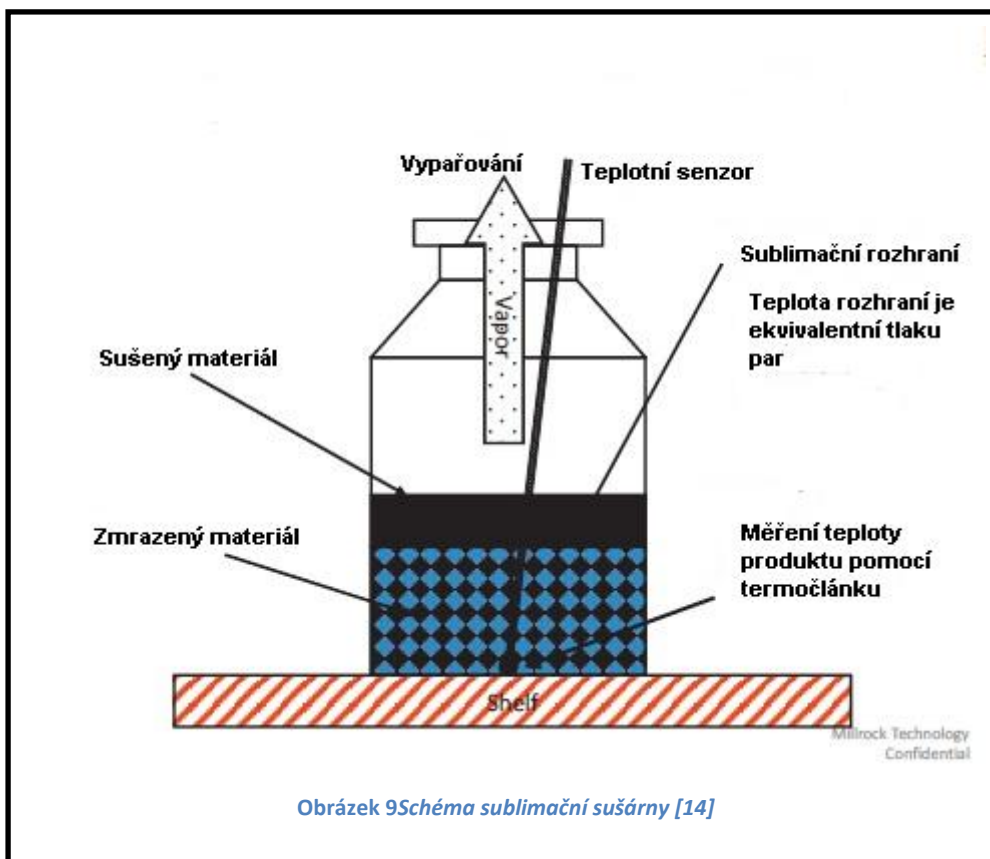
Obrázek 8 Schéma fluidní sušárny [5]

5.6 Impaktní sušárna

Taky se jí někdy říká **trysková**. V sušárnách tohoto typu se nachází ofukovaná vrstva. Speciální je technologie sušení, kde **na pásy je tryskami přiváděn horký vzduch**. Používá se k sušení **textilu, papíru, folií, apod.** [21, str. 147]

5.7 Sublimační sušárna

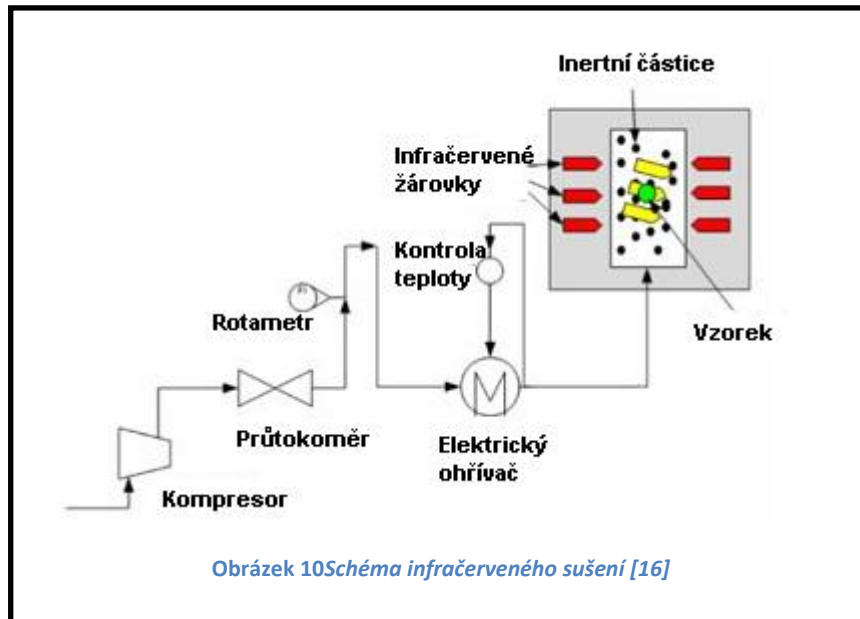
Sušárny pracují na principu **rychlého zmražení daného materiálu**, následně **vznikají krystalky, které chrání dané buňky sušeného materiálu**. Materiál můžeme takto chladit pomocí **vakuového chlazení, vzduchem nebo kapalným plynem**. Pak se při tlaku 10 až 100 Pa nechá **sublimovat pomocí přivedeného tepla, nesmí se ovšem překročit teplota tání ledu**. Tento proces je **velmi ekonomicky nákladný a i provozně extrémně náročný**. Používá **při zpracování krevní plasmy, kávy, hub, ovoce, zeleniny**. Sublimační sušárny mohou mít **spotřebu i 60 MJ na kilogram**. [3, str. 258]



5.8 Sušárna s infračerveným zářením

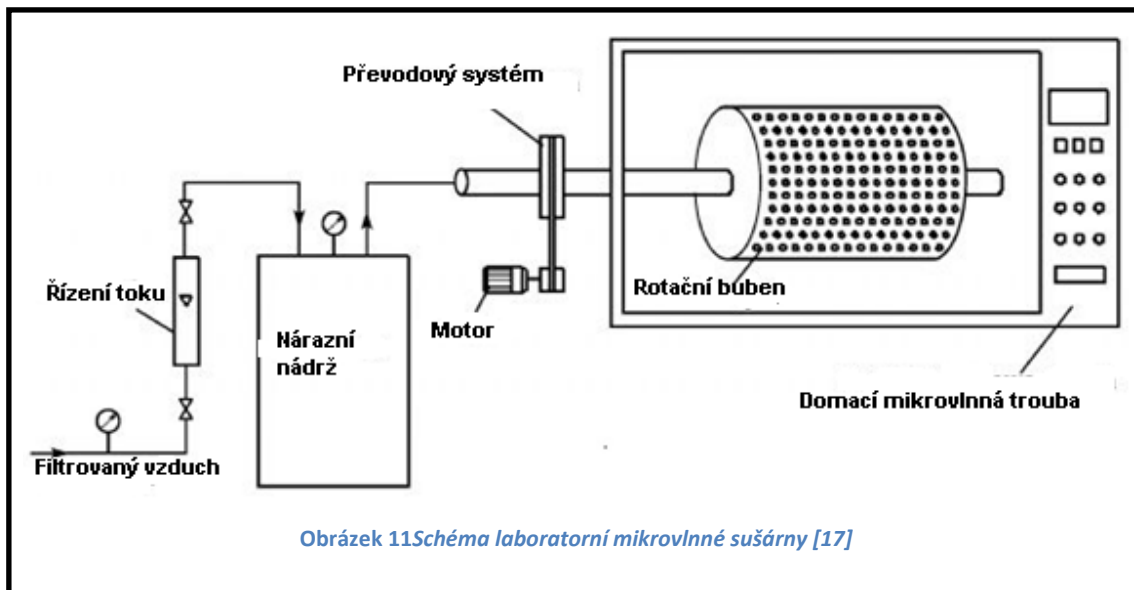
Povrchově ohřeje materiál k sušení. Na zařízení jsou odporově vyhřívaná ohřevná tělíska, která slouží ke katalytickému spalování plynu. Tento typ zařízení se používá na dosušování nebo se kombinuje s jinými zařízeními nejčastěji s konvektivním způsobem sušení. Použití je v automobilovém průmyslu na sušení nátěrů, papíru, ovoce, zrní, textilu apod.

Je nutné myslet na to, že **určité typy materiálů nelze sušit rychle**, protože by došlo k jejich poškození, vytváření nechtěných efektů v daném materiálu, deformacím, vnitřním pnutí, mechanickému namáhání atd. Také jsou náchylné na různé změny teplot, a proto musíme **pro správný výsledek procesu různě manipulovat s teplotami při sušení a délkou samotného sušení.** [3, str. 258]

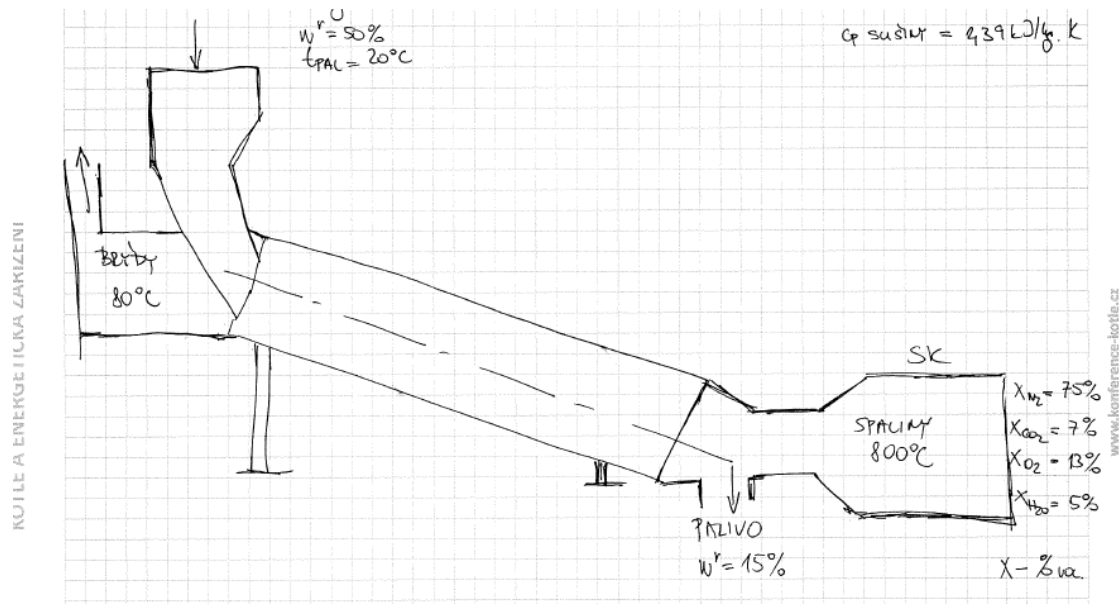


5.9 Mikrovlnná sušárna

Materiál uvnitř sušárny je ohříván pomocí mikrovln o frekvencích 900 či 2450 MHz. Voda je vypuzena zevnitř na povrch daného materiálu. Takový proces sušení je vhodný při náchylnosti materiálu proti mechanickému namáhání a teplotní změny. Používá se často k dosušování, ale je nevhodný pro materiály s vyšším obsahem vody než je 20%, konkrétně se používá pro dřevo, ovoce, zeleninu, keramiku, kůži, tabák, lepidla, PVC, textil, léky, polyamidy a další. [3, str. 258] [21, str. 152]



6. Bilanční výpočet sušárny



Obrázek 12Zadání sušárny

6.1 Bilance materiálu k sušení

Počáteční vlhkostsušeného materiálu

$$x_{1A} = 0,50 [-]$$

Konečná vlhkost sušeného materiálu

$$x_{2A} = 0,15 [-]$$

Množství usušeného materiálu

$$\dot{m}_c = 100 \text{ [kg/hod]}$$

Množství vody v usušeném materiálu

$$\dot{m}_c = \dot{m}_c \cdot x_{2A} \text{ [kg/hod]}$$

$$\dot{m}_{2w} = 100 \cdot 0,15 = 15 \text{ [kg/hod]}$$

Množství sušiny

$$\dot{m}_{2A} = \dot{m}_c \cdot (1 - x_{2A}) = \dot{m}_c - \dot{m}_{2w} \text{ [kg/hod]}$$

$$\dot{m}_{2A} = 100 \cdot (1 - 0,15) = 85 \text{ [kg/hod]}$$

Množství vlhkého materiálu

$$\dot{m}_{1A} = \dot{m}_c \cdot \frac{1 - x_{2A}}{1 - x_{1A}} \text{ [kg/hod]}$$

$$\dot{m}_{1A} = 100 \cdot \frac{1 - 0,15}{1 - 0,50} = 170 \text{ [kg/hod]}$$

Množství vody v sušeném materiálu

$$\dot{m}_{1w} = \dot{m}_{1A} - \dot{m}_{2A} [\text{kg/hod}]$$

$$\dot{m}_{1w} = 170 - 85 = 85 [\text{kg/hod}]$$

Množství odpařené vody během sušení

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{1A} - \dot{m}_c [\text{kg/hod}]$$

$$\dot{m}_W = 170 - 100 = 70 [\text{kg/hod}]$$

6.2 Tepelná bilance sušárny

Měrná tepelná kapacita vodní páry

$$c_{vp} = 1840 [\text{J/kg} \cdot \text{K}]$$

Měrná tepelná kapacita vody

$$c_v = 4180 [\text{J/kg} \cdot \text{K}]$$

Měrná tepelná kapacita sušiny

$$c_s = 2390 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$$

Měrné výparné teplo vody

$$r_{FG} = 2500 \text{ [kJ/kg]}$$

Počáteční teplota sušeného materiálu

$$t_{1A} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplota spalin, vodní páry vystupujících ze sušárny

$$t_{1B} = 80 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplota varu vody

$$t_v = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplo potřebné k zahřátí sušiny

$$Q_{Os} = c_s \cdot \Delta t \cdot \dot{m}_w \text{ [J]}$$

$$Q_{Os} = 2390 \cdot (100 - 20) \cdot 85 = 16252000 \text{ [J]} = 16,252 \text{ [MJ]}$$

Teplo potřebné k ohřevu vody

$$Q_{OHv} = c_v \cdot \Delta t \cdot \dot{m}_w [J]$$

$$Q_{OHv} = 4180 \cdot (100 - 20) \cdot 70 = 23408000 [J] = 23,408 [MJ]$$

Teplo potřebné k ohřevu vodní páry

$$Q_{OHvp} = c_{vp} \cdot \Delta t \cdot \dot{m}_w [J]$$

Q_{OHvp} = výstupní teplota je nižší než teplota varu: neuvažujeme

Teplo potřebné k odpaření vody

$$Q_{OD} = r_{FG} \cdot \dot{m}_w [kJ]$$

$$Q_{OD} = 2500 \cdot 70 = 175000 [kJ] = 175 [MJ]$$

Celkové potřebné teplo

$$Q_c = Q_{Os} + Q_{OHv} + Q_{OD} [MJ]$$

$$Q_c = 16,252 + 23,408 + 175 = 214,66 [MJ]$$

6.3 Bilanční výpočty objemů a vlhkosti

Entalpie složek spalin při 80[°C]:

$$i_{CO_2} = 136 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{N_2} = 103,6 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{H_2O} = 120,5 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{O_2} = 105,4 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Entalpie složek spalin při 800[°C]

$$i_{CO_2} = 1705 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{N_2} = 1093 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{H_2O} = 1335 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$i_{O_2} = 1159 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

t [°C]	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	Vzduch suchý	CO	O ₂	Popílek [kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710

Obrázek 13 Tabulka měrných entalpií vybraných složek spalin [20, str. 17]

Objemové hmotnostní zlomky spalin

$$x_{CO_2} = 7[\%]$$

$$x_{N_2} = 75[\%]$$

$$x_{H_2O} = 5[\%]$$

$$x_{O_2} = 13[\%]$$

Minimální entalpie spalin při 80[°C]

$$I_{sp(80^\circ C)min} = x_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + x_{N_2} \cdot i_{N_2} + x_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + x_{O_2} \cdot i_{O_2} [kJ/m^3],$$

$$I_{sp(80^\circ C)min} = 0,07 \cdot 136 + 0,75 \cdot 103,6 + 0,05 \cdot 120,5 + 0,13 \cdot 105,4 = 106,947 [kJ/m^3] \\ \doteq 106,95 [kJ/m^3]$$

Minimální entalpie spalin při 800[°C]

$$I_{sp(800^{\circ}\text{C})min} = x_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + x_{N_2} \cdot i_{N_2} + x_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + x_{O_2} \cdot i_{O_2} [\text{kJ}/\text{m}^3],$$

$$I_{sp(800^{\circ}\text{C})min} = 0,07 \cdot 1705 + 0,75 \cdot 1093 + 0,05 \cdot 1335 + 0,13 \cdot 1159 = 1156,52 [\text{kJ}/\text{m}^3]$$

Rozdíl minimálních entalpií spalin

$$\Delta I_{spmin} = I_{sp(800^{\circ}\text{C})min} - I_{sp(80^{\circ}\text{C})min}$$

$$\Delta I_{spmin} = 1156,52 - 106,95 = 1049,57 [\text{kJ}/\text{m}^3]$$

Množství spalin vstupujících do sušárny

$$V_{CEL} = \frac{Q_c}{\Delta I_{spmin}} [\text{m}^3/\text{hod}]$$

$$V_{CEL} = \frac{214660000}{(1156520 - 106947)} = 204,52 [\text{m}^3/\text{hod}]$$

Množství spalin vystupujících ze sušárny

$$V_{CELout} = V_{CEL} + \frac{\dot{m}_w}{\rho_w} [\text{m}^3/\text{hod}]$$

$$V_{CELout} = 204,52 + \frac{70}{971,8} \doteq 204,59 [\text{m}^3/\text{hod}]$$

Vlhkost spalin vystupujících ze sušárny

$$x_{2B} = \frac{V_{CEL} \cdot x_{H_2O} + \frac{\dot{m}_w}{\rho_w}}{V_{CELout}}$$

$$x_{2B} = \frac{204,52 \cdot 0,05 + \frac{70}{971,8}}{204,59} \cdot 100 \doteq 5 [\%]$$

6.4 Výpočet rozměrů bubnu sušárny

Objem bubnu sušárny

$$V = \frac{\dot{m}_c}{\rho_s \cdot \psi} [m^3]$$

$$V = \frac{100}{320 \cdot 0,1} = 3,125 [m^3]$$

Průměr bubnu sušárny

$$d = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} [m]$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{3,125}{\pi}} = 0,998 \doteq 1 [m]$$

Délka bubnu sušárny

$$l = 4 \cdot d = 4 [m]$$

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat **rešerši principu a technologií při sušení biomasy a také provést bilanční výpočty pro zadanou bubnovou sušárnu.**

Práce měla dvě stěžejní části a to rešeršní a výpočtovou.

V rešerši byl hlavní cíl práce zaměřit se **popsání principu a technologií sušení** jednotlivých sušáren a také **stručné rozdělení** technologií sušáren.

U **bilančního výpočtu** sušárny bylo nutno zjistit, **kolik tepla je nutné dodat k zisku 100 kg výsledného paliva o vlhkosti 15 % po vysušení.** Palivo bylo sušeno spalinami z 50 % vlhkosti a původně vážilo 170 kg. Sušeným prvkem je ferment. **Z bilančních výpočtů** bylo zjištěno, že **celkové teplo** potřebné k ohřevu vody, odpaření vody a zahřátí sušiny, dosahuje hodnoty téměř **215 MJ.** Následně se vypočítalo **objemové množství spalin potřebné k danému úkonu.** Toto množství činilo **204,52 m³/hod na vstupu a na výstupu i s odpařenou vodou 204,59 m³/hod.** Na konci bilančních výpočtů byly stanoveny rozměry bubnu sušárny.

Seznam použitých zdrojů a literatury:

[1]KALUS, Vlastislav. *Analýza provozních a ekonomických ukazatelů plynové sušárny zemědělských komodit*. Brno, 2010, Diplomová práce. Mendelova univerzita. Vedoucí práce Ing. Josef Los, Ph.D.

[2]ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-589-7.

[3]HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.

[4]STRAKA, L. Sušení biomasy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

[5] FOUKAL, Martin. <http://www1.fs.cvut.cz>: Aplikace fluidní sušárny v cukrovaru [online]. [cit. 30. 4. 2017]. Dostupný na WWW: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/students/alumni/00s/2005/foukal/diplom.htm>

[6]ŠNITA. <https://vydavatelstvi.vscht.cz/> [online]. 2006 [cit. 30. 4. 2017]. Dostupný na WWW: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-589-7/pdf/259.pdf

[7] HASAL, P.; SCHREIBER, I.; ŠNITA, D. <https://vydavatelstvi.vscht.cz/> [online]. 2007 [cit. 30. 4. 2017]. Dostupný na WWW: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-978-80-7080-002-7/pdf/258.pdf

[8]HOFFMAN, Pavel a kol. SKRIPTUM ČVUT FSI. <http://www1.fs.cvut.cz>: Návod k laboratornímu cvičení [online]. 2003 [cit. 4. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/5rocnik/exp/spdryer/pdf/susarna.pdf>

[9] FOŘT, I. a kol. SKRIPTUM ČVUT FSI. *Návod k laboratornímu cvičení* [online]. 1993 [cit. 4. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/5rocnik/exp/spdryer.htm>

[10]<http://ari.wikidot.com/uchovatelnost-potravin-fyzikalni-vlastnosti#toc3>,

tento odkaz uvádí autor, že z něho čerpal, ale je to soukromá stránka

KALUS, Vlastislav. *Analýza provozních a ekonomických ukazatelů plynové sušárny zemědělských komodit* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti=36068>. Vedoucí práce Ing. Josef Los, Ph.D.

[11]PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6

[12]QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

[13]MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

[14]PHARMATECH. *Auto-Dry Technology* [online]. [cit. 8.5.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.pharma-tech.it/auto-dry-technology/>

[15]THE AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY. *DielectricDrying* [online]. [cit. 8. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://fennerschool-associated.anu.edu.au/fpt/drying/dielectric.html>

[16]WALTER, H. G; M. WEST, Richard. <http://www.scielo.br> [online]. [cit. 8. 5. 2017]. Dostupný na WWW: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322012000200004 ISSN 0104-6632.]

[17]WANG, Ruifang; LI, Zhanyong; YE, Jingsheng; LI, Zhanyong; LI, Yanhua; *Soybeandryingcharacteristics in microwaverotarydryerwithforcedconvection* [online]. [cit. 8. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://journal.hep.com.cn/fcse/EN/10.1007/s11705-009-0022-y>

[18]VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA ZDRAVOTNICKÁ A STŘEDNÍ ZDRAVOTNICKÁ ŠKOLA HRADEC KRÁLOVÉ. *Sušení* [online]. [cit. 10. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>

[19]TZB. *Tzbinfo* [online]. [cit. 11. 5. 2017]. Dostupný na WWW: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kondenzace/7912-junkers-tipy-pro-topenare-xii-teoreticke-zaklady-kondenzacni-techniky>

[20] VACULÍK, Jaroslav. *Diplomová práce* [online]. [cit. 11. 5. 2017]. Dostupný na WWW: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86173

[21]JELEMENSKÝ, Karol a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia vysokoškolských učebnic. ISBN 80-227-1416-x

[22]RUBINOVÁ, R.. *VZDUCHOTECHNIKA* [online]. [cit. 25.5.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/vzt.htm>

Seznam symbolů a zkratk:

- x_{1a} [-] Počáteční vlhkost sušeného materiálu
 x_{2A} [-] Konečná vlhkost sušeného materiálu
 \dot{m}_C [kg/hod] Množství usušeného materiálu
 \dot{m}_{2w} [kg/hod] Množství vody usušeného materiálu
 \dot{m}_{2A} [kg/hod] Množství sušiny
 \dot{m}_{1A} [kg/hod] Množství vlhkého materiálu
 \dot{m}_{1w} [kg/hod] Množství vody v sušeném materiálu
 \dot{m}_w [kg/hod] Množství odpařené vody během sušení
 c_{vp} [J/kg · K] Měrná tepelná kapacita vodní páry
 c_v [J/kg · K] Měrná tepelná kapacita vody
 c_s [J/kg · K] Měrná tepelná kapacita sušiny
 r_{FG} [kJ/kg] Měrné výparné teplo vody
 t_{1A} [°C] Počáteční teplota sušeného materiálu
 t_{1B} [°C] Teplota spalin, vodní páry vystupujících ze sušárny
 t_v [°C] Teplota varu vody
 Q_{Os} [J] Teplo potřebné k zahřátí sušiny
 $Q_{O Hv}$ [J] Teplo potřebné k ohřevu vody
 Q_{OD} [kJ] Teplo potřebné k odpaření vody
 Q_c [MJ] Celkové potřebné teplo
 i_{CO_2} [kJ/m³] Měrná entalpie oxidu uhličitého
 i_{N_2} [kJ/m³] Měrná entalpie dvouatomové molekuly dusíku
 i_{H_2O} [kJ/m³] Měrná entalpie vody
 i_{O_2} [kJ/m³] Měrná entalpie dvouatomové molekuly kyslíku
 x_{CO_2} [%] Objemový zlomek oxidu uhličitého

x_{N_2} [%] Objemový zlomek dvouatomové molekuly dusíku

x_{H_2O} [%] Objemový zlomek vody

x_{O_2} [%] Objemový zlomek dvouatomové molekuly kyslíku

$I_{sp(80^\circ C)min}$ [kJ/m^3] Minimální entalpie spalin při 80 stupňů Celsia

$I_{sp(800^\circ C)min}$ [kJ/m^3] Minimální entalpie spalin při 800 stupňů Celsia

$\Delta I_{spmín}$ [kJ/m^3] Rozdíl minimálních entalpií spalin

V_{CEL} [m^3/hod] Množství spalin vstupujících do sušárny

V_{CELout} [m^3/hod] Množství spalin vystupujících ze sušárny

V [m^3] Objem bubnu sušárny

ψ [-] Součinitel zaplnění bubnu sušárny

ρ_S [kgm^3] Hustota sušiny s 50 % vzduchu

l [m] Délka bubnu sušárny

d [m] Průměr bubnu sušárny

x_{2B} [%] Vlhkost spalin vystupujících ze sušárny

Seznam obrázků.

Obrázek 1 Diagram stavových veličin vlhkého vzduchu v h-x diagramu [22]	11
Obrázek 2 Graf závislosti obsahu vlhkosti na čase [18]	12
Obrázek 3 Graf ohřevu vody, závislost teploty na dodaném teple [19]	12
Obrázek 4 Schéma rotační bubnové sušárny + ukázky vestavby bubnu [6]	15
Obrázek 5 Schéma lopatkové sušárny [7, str. 258]	16
Obrázek 6 Schéma dielektrické sušárny [15]	17
Obrázek 7 Schéma rozprašovací sušárny [8, str. 2].....	18
Obrázek 8 Schéma fluidní sušárny [5]	19
Obrázek 9 Schéma sublimační sušárny [14].....	20
Obrázek 10 Schéma infračerveného sušení [16].....	21
Obrázek 11 Schéma laboratorní mikrovlnné sušárny [17]	22
Obrázek 12 Zadání sušárny	23
Obrázek 13 Tabulka měrných entalpií vybraných složek spalin [20, str. 17]	29