



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# BIOMASA

-

## OBNOVITELNÝ ZDROJ ENERGIE

*Výukový materiál*

Zpracoval: Ing. Michaela Zárybnická



## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### OBSAH

1	Úvod .....	3
2	Biomasa jako palivo .....	3
2.1	Rozdělení biomasy .....	3
2.2	Charakteristické vlastnosti .....	4
2.3	Formy vody ve struktuře dřeva .....	8
2.4	Metody měření vlhkosti .....	9
2.5	Kotle na biomasu .....	10
3	Princip a technologie sušení .....	10
3.1	Složení a stavba kmene stromů .....	10
3.2	Podstata procesu sušení .....	11
3.3	Kinetika sušení .....	11
3.4	Statika sušení .....	13
3.5	Doba sušení .....	13
3.6	Způsoby sušení .....	13
3.6.1	Pasivní sušení .....	13
3.6.2	Aktivní sušení .....	14
3.7	Druhy sušících zařízení .....	14



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# 1. ÚVOD

Biomasa je téměř jakákoliv hmota organického původu, ať už rostlinného či živočišného. V souvislosti s energetikou se většinou jedná o dřevní odpad, slámu a další zemědělské zbytky, ale i exkrementy užitkových zvířat. Biomasa je využívána jako biopalivo a patří do skupiny tzv. obnovitelných zdrojů energie (OZE). Po slunečním záření a větru byla biomasa jediným dostupným energetickým zdrojem na Zemi po miliardy let. Neuvažujeme-li potraviny, využívá lidstvo biomasu jako zdroj energie od okamžiku, kdy se člověk naučil rozdělovat a udržovat oheň.

Jedním z hlavních problémů při zpracování biomasy je míra její vlhkosti, která snižuje výhřevnost dané hmoty. Spalování velmi vlhkých paliv v podobě různých druhů biomasy je komplikované a má neblahý dopad nejen na celkovou účinnost spalovacího procesu, ale i na zvýšenou tvorbu škodlivých emisí. Je tudíž žádoucí využívat různé metody vedoucí ke snížení vlhkosti před dalším zpracováním a využíváním biomasy.

# 2. BIOMASA JAKO PALIVO

Biomasa je obecně považována za jeden z nejperspektivnějších obnovitelných zdrojů energie. Nejčastěji se využívá pro výrobu tepla spalováním v topeništích. Spalování paliva může být rozděleno na tři fáze:

- sušení paliva
- zplyňování prchavých složek
- finální spalování pevného zbytku

Uvádí se, že spalování biomasy je z hlediska emisí oxidu uhličitého neutrální, neboť množství produkovaného oxidu uhličitého je srovnatelné s množstvím, spotřebovaným rostlinami při jejich růstu (fotosyntéza). Je to ovšem zjednodušený pohled, neboť stromy rostou desítky let a dřevo z nich se spálí okamžitě. Navíc při spalování biomasy vznikají i další škodliviny, a to některé velmi nebezpečné jako polyaromatické uhlovodíky, případně dioxiny. Měření ale prokázala, že o množství škodlivých emisí rozhoduje především způsob spalování.

## 2.1 Rozdělení biomasy

Biomasu můžeme dělit podle různých kritérií, nejčastější je dělení na tzv. suchou (např. dřevo, lesní odpad) a mokrou (např. tekuté i pevné exkrementy hospodářských zvířat) biomasu, další možné rozdělení je z pohledu energetických přeměn biomasy. V poslední době se stále více rozšiřuje cílené pěstování biomasy jako energetické suroviny.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- **zemědělská biomasa (fytomasa pěstovaná na zemědělské půdě)**
  - cíleně pěstovaná biomasa
  - biomasa obilovin, olejnin a pradných rostlin
  - trvalé travní porosty
  - rychlerostoucí dřeviny pěstované na zemědělské půdě
  - rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny
- **lesní biomasa (dendromasa)**
  - palivové dřevo
  - zbytky z hospodaření v lesích
- **zbytková biomasa (vedlejší produkty zemědělského a zpracovatelského průmyslu)**
  - vedlejší produkty a zbytky z papírenského průmyslu
  - vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu
  - vedlejší produkty a zbytky z průmyslu na zpracování dřeva
  - vedlejší produkty a zbytky z živočišného průmyslu
  - vedlejší produkty a zbytky z ostatního průmyslu
  - biologicky rozložitelný odpad
  - lihovarnické výpalky

## 2.2 Charakteristické vlastnosti biomasy

Nejdůležitější vlastnosti biomasy jsou:

- **výhřevnost**
- **obsah popelovin**
- **chemické složení hořlaviny**
- **vlhkost**

### Výhřevnost

Je to jedna z nejdůležitějších vlastností paliv. Výhřevnost je teplo, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva, jestliže voda vzniklá spalováním zůstává v plynném stavu. Výhřevnost biomasy se mění v závislosti na druhu použité biomasy a množství vlhkosti v palivu obsažené. Biomasa obsahující pryskyřice a oleje má výhřevnost vyšší.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



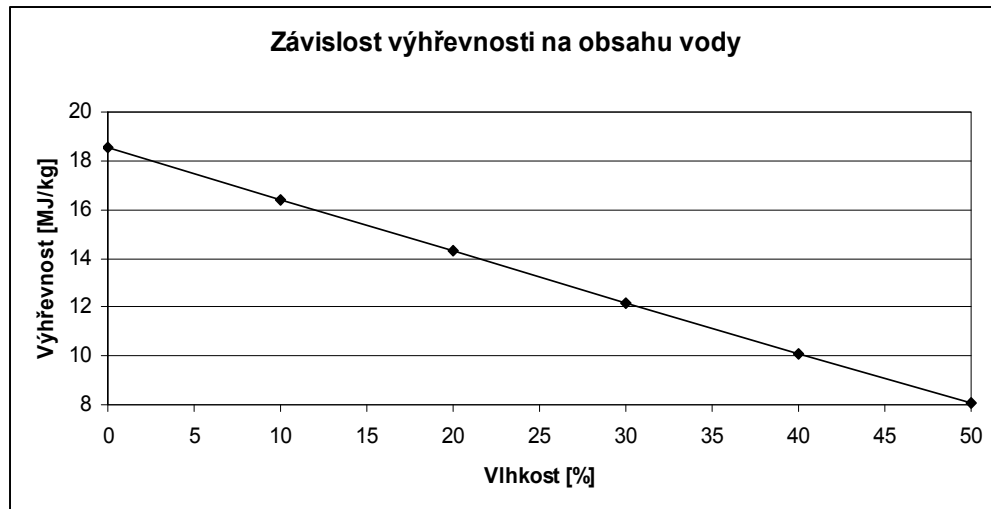
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Graf č.1: Závislost výhřevnosti na obsahu vody v biomase



### Obsah popela

Dalším velmi důležitým parametrem paliva je obsah popela, respektive jeho teplota tavení. Popel je podíl paliva, který získáme jeho dokonalým spálením. Vzniká z minerálních složek obsažených ve spalovaném palivu, které se nazývají popeloviny. Při spalování paliva se popeloviny teplem rozkládají v oxidační atmosféře a těkavé podíly přecházejí do spalin. Popel stejně jako voda je nežádoucí složkou paliva, jak z hlediska výhřevnosti, tak z hlediska chování paliva.

Je-li teplota tavení popele nižší než teplota plamene při hoření, pak dochází k zalepování roštu ohniště. Tento nežádoucí jev způsobuje značné problémy při samotném spalování. Zalepením pohyblivých roštů, popřípadě šamotové vyzdívky, se velmi razantním způsobem snižuje funkčnost kotle. Palivo dokonale neprohoří, čímž se nejen snižuje účinnost kotle, ale roste i obsah škodlivých látek v odcházejících spalinách. Nánosy popelovin na stěnách topeniště difundují do vyzdívky, která se následně po tenkých vrstvách odlupuje. Proto se tomuto problému musí předcházet takovým způsobem, že teplota na roštu by měla být nižší, než je teplota tavení spalované biomasy.

Obecně se dá říci, že obsah popela ve dřevě je ve srovnání s ostatními pevnými palivy velmi nízký. Ve dřevě se množství pohybuje v rozmezí 0,6 – 1,6 %, u kůry může ojediněle překročit 3 %. Vyšší obsah popela v kůře stromů než ve dřevě je zřejmě dán jejím větším znečištěním. Obsah popela v černém uhlí je v mezích 20 – 30 %, u hnědého uhlí může být toto množství i daleko větší.

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Chemické složení hořlaviny

Pro spalování biomasy je typické hoření tzv. dlouhým plamenem. Biopaliva totiž obsahují velký podíl plynných látek uvolňovaných pyrolýzou nehořících na roštu, ale v prostorách nad roštem. Tyto hořlaviny pak obvykle dohořívají ve speciální dohořivací komoře. Biomasy lze spalovat v klasických zdrojích, ale účinnost spalování je velmi nízká a zároveň při tomto spalování vznikají vysoké emise.

Jednou z velkých předností je, že biomasa obsahuje pouze minimální množství nebo žádné množství síry, a tak během spalování nedochází ke vzniku škodlivých sloučenin s jejím obsahem. Další výhodou absence síry je nižší teplota spalin odcházejících do komína. V dnešní době je ovšem často velmi diskutováno o obsahu chloru.

Nejpodstatnější chemické prvky přítomné v hořlavině ukazuje Tab. č. 1., procentuální hodnoty jsou pouze orientační.

Tab. č. 1: Chemické složení hořlaviny

Složka	Dřevo		
	Jehličnaté	Listnaté	Kůra
[%]			
$C^{daf}$	51,0	50,0	51,4
$H^{daf}$	6,2	6,2	6,1
$O^{daf}$	42,2	43,3	42,2
$S^{daf}$	0,02	0,02	0,05
$N^{daf}$	0,6	0,6	0,3
$A^{daf}$	1,0	1,0	2,3

### Vlhkost

Vlhkost, nebo-li obsah vody v biomase, kterou hodláme spalovat, je základním parametrem, podle kterého se řídíme při výběru spalovacího zdroje, protože právě vlhkost je významnou veličinou určující kvalitu spalovacího procesu. Snahou je získat palivo s co nejnižším obsahem vody. Vlhkost závisí především na tom, z jakých zdrojů biomasy získáváme. Palivo z dřevozpracujícího průmyslu se obvykle vyznačuje vyšší vlhkostí než palivo vzniklé zemědělskou činností.

Důležitým rozdílem ve vyjadřování vlhkosti je, zdali máme na mysli dřevozpracující průmysl, nebo energetickou praxi.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- **Dřevařské vyjadřování vlhkosti** – V dřevozpracujícím průmyslu se obsah vody vztahuje k suchému vzorku.

### Obecný vzorec pro výpočet vlhkosti:

$$w_d = \frac{m_p - m_o}{m_o} \cdot 100\%$$

$m_p$  ... počáteční váha vzorku

$m_o$  ... váha vzorku po vysušení

V konkrétním případě to znamená, že při hmotnosti vody 0,5 kg v 1 kg původního vzorku je v tomto případě vlhkost dřevařská při hmotnosti vysušeného vzorku 0,5 kg.

$$w_d = \frac{0,5}{0,5} \cdot 100 = 100\%$$

- **Energetické vyjadřování vlhkosti** – V energetické praxi se však vztahuje obsah vody k původnímu vzorku.

### Obecný vzorec pro výpočet vlhkosti:

$$w_e = \frac{m_p - m_o}{m_p} \cdot 100\%$$

Při hmotnosti vody 0,5 kg v 1 kg původním vzorku bude energetická vlhkost.

$$w_e = \frac{0,5}{1,0} \cdot 100 = 50\%$$



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## 2.3 Formy vody ve struktuře dřeva

Vlhkostí dřeva rozumíme podíl obsahu vody v něm. Podíl ostatních složek dřeva označujeme souhrnným názvem sušina. Dřevo, jak již bylo vysvětleno je materiálem hygroskopickým, má tendenci uchovávat svoji vlhkost v rovnovážné poloze. Dřevo bobtná a sesychá pouze při změnách vlhkosti v intervalu od absolutně suchého dřeva až do bodu nasycení vláken.

Bod nasycení vláken dřeva je definován jako stupeň obsahu vody, při kterém jsou buněčné stěny plně nasyceny vázanou vodou, ale není přítomná žádná volná voda v buněčné dutině.

Obsah vody se u dřevitých materiálů pohybuje v rozsahu 20 % u sušených až po 65 % v surovém stavu. U travin a dužnatých frakcí je to i více, ale ty jsou využitelné pouze usušené. Rostoucí strom potřebuje vodu ke svému životu, získává ji pomocí kořenů z půdy. Množství potřebné vody je obrovské. Po skácení stromu zůstává voda, pokud se nevypaří, ve dřevě. Vlhkostí dřeva tedy rozumíme vodu, která je v něm obsažena, obsah vlhkosti je však vždy různý.

Rozlišujeme několik možností, jak může být voda ve dřevě vázána:

- **volná (kapilární) voda** – Při sušení dřeva se nejdříve vypařuje voda z cév a buněčných dutin, jedná se o takzvanou volnou (kapilární) vodu. Tato voda se vypařuje sama nebo ji lze ze dřeva odstranit mechanicky, například lisováním či odstředováním. Má menší význam než voda vázaná.
- **vázaná voda** – Mnohem obtížněji se ze dřeva vypařuje voda vázaná, která je uložena ve stěnách buněk mezi jednotlivými vlákenky. Tato voda je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny  $OH^-$  amorfní části celulózy a hemicelulózy. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0 – 30 %. Tuto vodu nelze ze dřeva odstranit mechanicky, ale lze to za pomoci tepla, jedná se tedy o přeměnu kapalné vlhkosti na vodní páru. Voda vázaná je někdy nazývána vodou hygroskopickou. Vyplývá to z vlastnosti, že vodu vázanou může dřevo přijmout i ve formě vodní páry. Vázaná vlhkost se tvoří v důsledku vazby s molekulami látky a je charakterizována následujícími fyzikálně-chemickými vlastnostmi:
  - má měrnou tepelnou kapacitu nižší než je obvyklá a přibližně rovnou měrnému teple ledu
  - zamrzá při velmi nízkých teplotách pod bodem mrazu
  - má vyšší hustotu ve srovnání s volnou vlhkostí
  - je neelektrovodivá, na rozdíl od čisté vody, protože neobsahuje rozpustné látky.

Hranice mezi vlhkostí volnou a vázanou se označuje jako bod nasycení vláken, jedná se o vlhkost, při které dřevo obsahuje všechnu vodu vázanou, ale žádnou vodu volnou. Je možná i další klasifikace vazeb vlhkosti s materiálem.

- **chemicky vázaná voda** – Z biomasy ji lze odstranit pouze spálením, proto se objevuje i při nulové absolutní vlhkosti. Zjišťuje se při chemických analýzách paliva a její celkové množství představuje 1 – 2 % sušiny.



## 2.4 Metody měření vlhkosti

Při sušení dřeva s velkou počáteční vlhkostí, se voda podle intenzity odparu na povrchu rozdělí, podle určitých zákonitostí vzhledem k tloušťce materiálu. Problém měření vlhkosti biomasy však spočívá v tom, že obsah vlhkosti je velice různý a navíc se vlivem okolního prostředí (vzdušná vlhkost, teplota, tlak) v čase mění. Je však možné použít několik způsobů, jak měřit vlhkost.

- **přímé metody** – Stanovení vlhkosti oddělením vody od pevné fáze, jedná se o metody za pomoci váhové (gravimetrické) a destilační zkoušky.
- **specifické vlastnosti vody** – Stanovení vlhkosti na základě specifických vlastností vody, využívá se odezva některých chemických reakcí, pohltivost elektromagnetického záření vysokých frekvencí, zpomalovací účinek vodíkových jader na rychlé neutrony vysoká rozpouštěcí schopnost a další.
  - spektrometrická metoda
  - metoda nukleární magnetické rezonance
  - metoda pohlcování gama a rentgenového záření
  - měření útlumu mikrovlnné energie
- **nepřímé metody (možné využití jiných veličin v souvislosti s obsahem vody)** – Jedná se o metody zaměřené na změnu elektrických vlastností materiálu (odporové, kapacitní, indukční) a metody zaměřené na změnu tepelných vlastností materiálu (změna součinitele tepelné vodivosti).

Váhová (gravimetrická) metoda – Tato metoda je nejpřesnější a nejčastěji využívanou metodou určení vlhkosti dřeva a je také referenční metodou při posuzování přesnosti ostatních metod. Váhová metoda spočívá ve zjištění hmotnosti vlhkého dřeva a absolutně suchého dřeva. Vlhkostní vzorek musí být zvážen ihned, protože ze vzorku rychle uniká vlhkost a později zjištěná váha by podávala nesprávný údaj. Vlhkostní vzorek vysoušíme v laboratorní sušárnice při 105 °C až do ustálené váhy. Několikrát vážíme, až nám váha vzorku neubývá.



Obr. č. 1: Halogenová sušící váha



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## 2.5 Kotle na biomasu

Biomasa se v posledních letech dostala opět do popředí zájmů výrobců a provozovatelů energetických zařízení. Při konstrukci kotle je nutné mít na paměti odlišnosti biomasy jako paliva oproti uhlí. Důležité je také to, že každý druh biomasy má odlišné vlastnosti a proto kotel na dřevní štěpku nelze bez úprav použít pro spalování slámy. Pro spalování biomasy lze použít různé typy roštových kotlů (pásové, šikmé, s přímým i vratisuvným roštem). Kotle na biomasu pro rodinný dům nejsou zrovna nejlevnější položkou, zpětně se však investice do nich vrátí.

## 3. PRINCIP A TECHNOLOGIE SUŠENÍ

### 3.1 Složení a stavba kmene stromů

Základními složkami chemického složení jsou organické a anorganické látky.

- **organické látky** – Tvoří převážnou část dřevní hmoty. Jsou tvořeny uhlíkem, kyslíkem, vodíkem a dusíkem. Průměrný obsah těchto látek v suchém dřevě je u všech dřevin stejný.
- **anorganické látky** – Jedná se o minerální sloučeniny, které se ve dřevě vyskytují pouze v malém množství. Jsou to soli křemíku, draslíku, sodíku, vápníku, hořčíku, manganu, železa a hliníku, které při spalování dřeva tvoří popel.

Kmen stromu má po celém obvodu kůru, která chrání strom za jeho života před zraněním, účinky ovzduší a škůdci. Pod kůrou je lýko, které slouží při růstu stromů k dopravě živin mezi korunou stromu a kořeny. Následuje kambium, což je malá vrstvička dělivého pletiva (rostlinné pletivo tvořené buňkami s dělivou funkcí). Každým rokem v růstu stromů se vytvoří na kambiu na vnější straně vrstva lýka a na vnitřní straně vrstva dřeva. Díky těmto soustředným kruhovým pásům jsou dobře rozlišitelné roční přírůstky zvané letokruhy. Ve středu kmene se nachází dřev, je to nejstarší část kmene a zde časem nejvíce dřevo praská.

Směrem od středu k obvodu kmene můžeme pozorovat tenké dřevňové paprsky. Pro sušení jsou důležité tím, že vedou vodu příčně v kmeni nebo řezivu a tím usnadňují odvod vlhkosti z vnitřních částí k povrchu. Na obvodu kmene je těchto paprsků více, proto vysychají krajová prkna rychleji než středová. Vnitřní letokruhy časem odumírají. Vnitřní část označujeme jako jádro a okrajovou jako běl. Jádrová část obsahuje tříslovinu, barvivo a pryskyřici, má menší obsah vlhkosti a hůře se vysouší. Běl má vysoký obsah vlhkosti a také hůře vysychá. Jehličnaté dřeviny mimo jedle obsahují pryskyřičné kanálky, to se někdy projeví při sušení výronem pryskyřice.

Při několikanásobném zvětšení kousku dřeva, je patrné, že se dřevo skládá z buněk. Buňky mají protáhlý tvar, o délce mezi 1 až 6 milimetry. Jednotlivé buňky jsou uzavřené, uvnitř duté, pevně k sobě srostlé, uspořádané podélně s osou kmene.

Stavba jehličnatých dřevin je poměrně jednoduchá, skládá se pouze z jednoho druhu buněk, oproti tomu listnaté stromy mají několik buněk, spojujících se do cév.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE

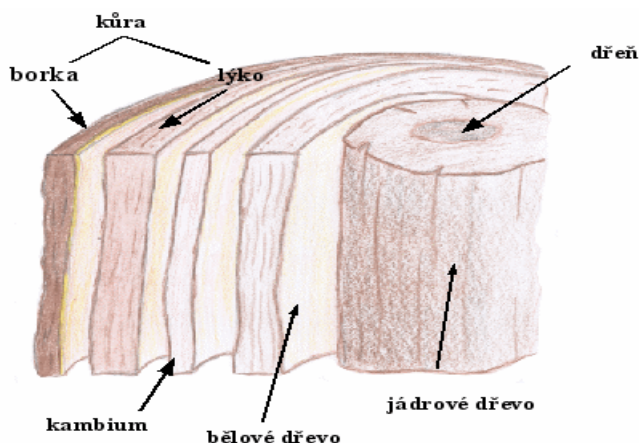


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obr. č. 2: Stavba kmene

### 3.2 Podstata procesu sušení

Sušení je běžný fyzikální proces odstraňování nežádoucí vody z příslušného paliva. Při samotném sušení vlhkých paliv probíhají vzájemně provázané procesy přenosu tepla a hmoty mezi palivem a sušicím médiem. Ke sdílení tepla potřebného k odpaření vody dochází v sušárně výhradně konvekcí ze sušicího média do sušeného materiálu. Z hlediska sdílení hmoty je nutno chápat sušení jako difúzní proces. Při odpařování vlhkosti z povrchu se narušuje rovnováha vlhkosti. Vnitřní části paliv mají vyšší obsah vlhkosti, a rovněž i nižší teplotu než povrchové vrstvy. Vzhledem k rozdílu obsahu vlhkosti povrchových a vnitřních vrstev vzniká gradient vlhkosti. Díky existenci gradientu obsahu vlhkosti probíhá kontinuální pokles vlhkosti v celém objemu sušicího materiálu.

Transport vlhkosti uvnitř sušeného materiálu ovlivňuje také termodifuze, která je podmíněna rozdílem teplot. Pod jejím vlivem se vlhkost pohybuje od oblastí s vyšší teplotou do oblastí s nižší teplotou, je to v závislosti na tvaru sorpčních izoterem. Při nízkoteplotním sušení termodifuze nemá podstatného významu, ale při vysokoteplotním sušení má značný vliv na sušení.

### 3.3 Kinetika sušení

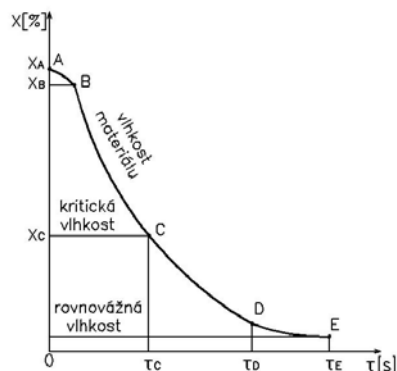
Jde o současné sdílení hmoty a tepla, a proto existuje hnací síla hmotová a teplotní. Tyto síly ovlivňují průběh sušení, jak je vidět na Obr. č. 3. Při kvalitativním procesu sušení budeme předpokládat, že částice pevného materiálu jsou zpočátku celé pokryty tenkou vrstvou vody. Při analýze křivek sušení můžeme rozlišit tři hlavní oblasti:

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- **úsek A–B (ohřev na odpařovací teplotu)** – Tato fáze sušení probíhá rychle a v porovnání s celkovou délkou sušení tento úsek často splývá s úsekem B – C nebo se zanedbává. Jedná se o to, že materiál se začne ohřívat z počáteční teploty na teplotu mokrého teploměru a zároveň se z povrchu začne odpařovat vlhkost. Hybné síly dějů sdílení tepla a hmoty budou nenulové a začne klesat koncentrace vody v materiálu. Proces probíhá po úseku křivky sušení od bodu A k bodu B. Odpařováním vody z povrchu se bude zpomalovat proces ohřívání materiálu, protože se na něj spotřebovává teplo dodávané ze sušicího média.
- **úsek B–C (konstantní rychlost sušení)** – Fyzikálně se tento případ podobá odpařování vody z volné hladiny. Materiál se nyní nachází v podmínkách odpovídajících bodu B, v tomto bodě dosáhl povrch materiálu teploty mokrého teploměru. Teplota materiálu se nemění a všechno teplo dodávané sušicím médiem se spotřebovává na odpařování volné vody. Přejdeme z bodu B do bodu C. Hodnota vlhkosti materiálu v tomto bodě je rovna kritické vlhkosti.

Délka této části (B–C) závisí na pórovitosti materiálu, vlhkosti a velikosti částic sušeného materiálu a na parametrech sušicího média. Pro případ dvojice voda-vzduch se teplota povrchu materiálu rovná teplotě vlhkého teploměru, za předpokladu, že teplo bude látce předáváno pouze prouděním. V praxi nebývá tato podmínka vždy splněna, protože se teplo předává často navíc i sáláním a vedením. Zvyšování rychlosti sušení v tomto úseku je tedy možné zvyšováním rozdílu parciálních tlaků, vyšší teplotou a rychlostí vzduchu a jeho nižší relativní vlhkostí.

- **úsek C–D (klesající rychlost sušení)** – V této části probíhá odpařování vázané vody. V okamžiku dosažení bodu C přestane celý povrch materiálu pokrývat vrstva kapaliny. Do styku se sušicím médiem se dostanou první částice materiálu rychlost sušení se začne snižovat. Materiál se začne ohřívat a jeho teplota se zvýší nad teplotu mokrého teploměru (bod D). Tím klesá hybná síla děje sdílení tepla a zpomaluje se i sdílení hmoty. V bodě E dosáhne teplota materiálu téměř teploty sušicího média a vlhkost materiálu je prakticky rovna rovnovážné vlhkosti.



Obr. č. 3: Sušicí křivka v závislosti měrné vlhkosti na době sušení



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Nemůže-li být k povrchu materiálu přiváděno z vnitřních vrstev tolik vlhkosti, kolik by se mohlo za stávajících podmínek odpařit, rychlost sušení se zpomaluje. Pro efektivnější průběh sušení je výhodné kritický bod posunout ve směru zmenšující se vlhkosti. Toho lze docílit především zlepšením rovnoměrnosti sušení, které zabrání vytvoření přeschlé povrchové kůry.

### 3.4 Statika sušení

Při vsádkovém sušení v konvekčních sušárnách se obvykle jedná o nepřetržité přivádění sušicího média se stálou teplotou a koncentrací vlhkosti, vsádka mokrého materiálu se postupně vysušuje a médium se ovlhčuje a také ochlazuje, neboť dodává materiálu energii na odpařování vlhkosti. Médium vystupující ze sušárny má vlhkost a teplotu závislou na čase, i když jeho vstupní vlastnosti se s časem nemění. Sušení z hlediska přenosu energie a hmoty se dá se zanedbáním ztratit vyjádřit následujícími rovnicemi popisující sušárnu. Sušárna pracuje ustáleně při protiproudu sušeného materiálu a sušicího média.

### 3.5 Doba sušení

Z ekonomických důvodů je snaha dobu sušení minimalizovat, ale nesmí to být na úkor kvality. Hlavní faktory ovlivňující dobu sušení:

- teplota, rychlost a relativní vlhkost sušicího média
- tvar sušené látky – tloušťka sušené vrstvy, rozměry částice,
- vlastnosti sušené látky – struktura
- počáteční, konečná a kritická vlhkost
- styk sušené látky se sušícím médiem
- volba sušicího média
- přípustná teplota látky
- nároky na rovnoměrnost usušení
- volba konstrukce sušárny

### 3.6 Způsoby sušení

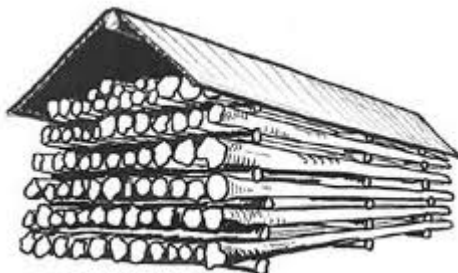
Materiál lze sušit přirozeným nebo umělým způsobem. Oba tyto způsoby mají své výhody a nevýhody.

#### 3.6.1 Pasivní (přirozené) sušení

Jedná se určitě o nejstarší způsob odstraňování vlhkosti ze hmoty. Přirozeně lze sušit materiál pod přístřeškem nebo lze použít voděodolnou nebo polopropustnou pokrývku. Nejjednodušší je palivo umístit na volném vzduchu nebo přímo na slunci. Voda se na povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu.

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zdá se, že tento způsob sušení je ideální, co se týká nákladů, ale při podrobnějším zkoumání zjistíme jisté hospodářské nevýhody. Hlavní nevýhodou přirozeného sušení je malá rychlost, což má za následek potřebu velkých skladovacích ploch a prostorů, které mohou být mnohdy finančně nákladné. Nárok na potřebu energie je téměř nulový, zato rostou náklady na dopravu a manipulaci.



Obr. č. 4: Sušení dřeva pod přístřeškem

### 3.6.2 Aktivní (umělé) sušení

Aktivní sušení je velmi rozšířený proces a dnes se provádí za pomoci sušáren. Vzhledem ke značně rozmanitým požadavkům na sušený materiál existuje mnoho typů sušáren, liší se především způsobem, jakým se dodává energie potřebná k sušení, a způsobem dopravy materiálu sušárnou.

### 3.7 Druhy sušících zařízení

Při sušení v sušárnách probíhají dva základní pochody.

- Sdílení tepla za účelem přeměny vody v páru.
- Přenos vodní páry z povrchu sušeného materiálu do sušícího média.

Sušárny většinou pracují v blízkosti atmosférického tlaku, je to z důvodu minimalizace netěsnosti sušícího zařízení. Vzduch nebo spaliny jsou nejběžnějším použitým sušícím médiem. Přehřátou páru jako sušící médium je vhodné použít např. v teplárnách, kde je možno použít odběrovou páru.

V průmyslu existuje velký počet sušáren. Hlavní možné kritérium pro rozdělení sušáren je způsob manipulace materiálem v sušárnách a také jakým způsobem se dodává energie potřebná k sušení. Pokud materiál přijímá energii z horkého sušícího média, které proudí sušárnou a je ve styku se sušeným materiálem, pak se jedná o konvekční sušárnu.

Těchto sušáren je mnoho typů (pneumatické, bubnové, pásové, atd.). Jindy se energie dodává materiálu zvenčí jako v sušárnách kontaktních, radiačních, dielektrických či mikrovlnných.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

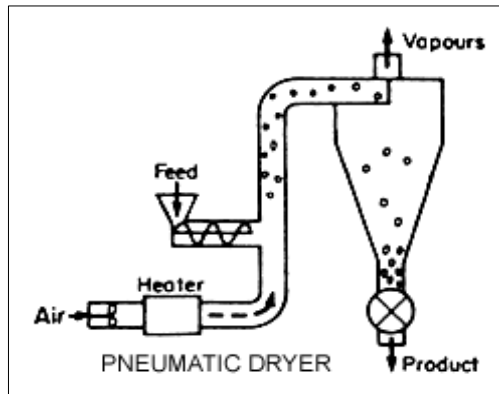


OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Pneumatická sušárna

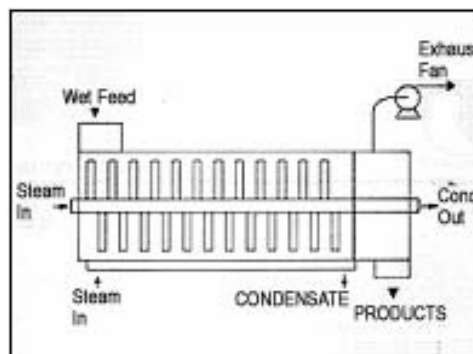
V pneumatické sušárně jsou pevné dřevěné kousky unášeny rychle ve vzduchovém proudu, rychlost a turbulence proudu udržují částice ve visu. Sušícím médiem je ohřátý vzduch, který zajišťuje, aby byl lehčí suchý materiál oddělen od vlhkého. Suchý materiál je odváděn pryč a vlhký zbytek je recirkulován pro další sušení.



Obr. č. 5: Pneumatická sušárna

## Lopátková sušárna

K sušení je využíváno dopravníkového pásu, který je opatřen lopatkami. Vlhký materiál je průběžně míchaný vyhřívanými otáčejícími břity, což má za následek vypařování vlhkosti a vysušování vlhkého materiálu na požadovanou suchost.



Obr. č. 6: Lopátková sušárna

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Sušárna s fluidní vrstvou

Základním principem fluidního sušení je, že dřevěný vlhký materiál se profukuje horkým vzduchem nebo jiným plynem proudícím zezdola přes perforované dno pracovního prostoru aparátu. Často se využívají příčné proudy vzduchu, které umožňují přenos dřeva skrz sušárnu. Kontakt částic vlhkého materiálu s horkým sušícím médiem je dokonalý, což usnadňuje a urychluje přestup tepla a zvyšuje využití entalpie sušícího média k odpařování kapaliny tvořící vlhkost sušeného materiálu. Uspořádání sušárny s fluidní vrstvou je podobné s pneumatickou sušárnou.



Obr. č. 7: Fluidní sušárna Tarok BS

### Šneková sušárna

K sušení je využíváno dopravníkového šneku, který je opatřen lopatkami. Šnekový dopravník zaručí nejen posun biomasy komorou, ale i její čechrání. V praxi je možné umístit až tři žlaby se šneky nad sebou, do horního je dopravována biomasa, která na konci šneku volně propadne do vany se šnekem pod sebou. Z posledního šneku je usušená biomasa dopravována pneumaticky nebo dopravníkem do zásobníku. Tato technologie je unikátní použitím šnekového dopravníku s lopatkami pro čechrání a vysoušení směsi, ale též využitím vyhřívání sušících komor za současného proudění ohřátého vzduchu o určité teplotě.



## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



*Obr. č. 8: Sušárna se šnekovým dopravníkem*

### **Bubnová sušárna**

Podobně jako v předchozích metodách se k vysoušení využívá horkého vzduchu, avšak zde je zásadní rozdíl v jeho teplotě. Na rozdíl od pásové sušárny zde se využívá spalin z kotle ochlazeného studeným vzduchem na teplotu 300–500 °C. Dávkování do bubnu je regulováno řídicím systémem tak, aby se výstupní teplota páry ze sušárny udržovala na konstantní teplotě. Buben sušárny je skloněn pod malým úhlem, z důvodu snazšího postupu sušeného materiálu, a je umístěn mezi kladkami, což umožňuje jeho otáčení kolem osy, které způsobuje přesypání štěrky uvnitř bubnu a zlepšuje tak prostupnost spalin, tudíž zvyšuje účinnost.



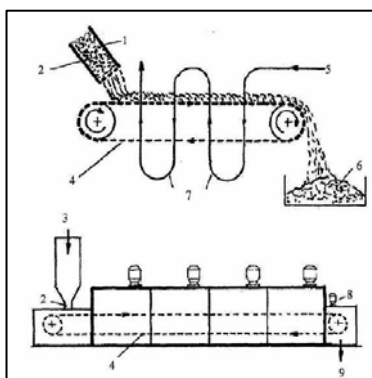
*Obr. č. 9: Bubnová sušárna*

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Pásová sušárna

U pásové sušárny je nejdůležitějším komponentem celého zařízení prodyšný sušicí pás na pásovém dopravníku, na kterém se pomocí dávkovacích šnekových dopravníků vytváří sušená vrstva. Sušený materiál musí být zbaven větších kusů dřeva či kovových částí, které by mohly způsobit mechanické poškození pásu.

Výhodou pásového sušení je nízká teplota a velký objem proudícího vzduchu. Díky tomu nedochází u pilin či dřevní štěrky k spálení či přesušení nebo jinému znehodnocení sušeného materiálu. Jako topné médium se dá použít horká voda nebo pára přes výměník nebo nepřímý ohřev pomocí hořáku na plyn, LTO, propan butan či zemní plyn.



Obr. č. 10: Pásová sušárna

### POUŽITÉ ZDROJE

- [1] DRAHOŠ, V., LANCINGEROVA, M. *Sušení dřeva*. Příloha k časopisu. Rozvoj techniky v dřevařském průmyslu
- [2] ZVONÍČEK, J.: *Sušárny*. Ediční středisko ČVUT Praha 1966
- [3] HRABÁNEK, R.: *Metody sušení biomasy*, Brno, 2010. 30 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.
- [4] PASTOREK, Z.: KÁRA, J., JEVIČ, P.: *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Vyd. 1. Praha: FCC PUBLIC, 2004. 288 s. ISBN 80-86534-06-5.