



SOUHRNNÁ ZPRÁVA

řešení za rok 2015

Název projektu:

Využití odpadního tepla k sušení zemědělských a bioenergetických produktů

Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

(IČ: 00027031)

Drnovská 507 , 16101 Praha 6 - Ruzyně

Statutární zástupce - ředitel VÚZT, v.v.i.

Odpovědný řešitel (vedoucí řešitelského týmu)

Ing. Jiří Souček, Ph.D.

.....

Číslo zprávy VÚZT: Z-2562

září 2015

Projektový a řešitelský tým

Objednatel:

Společnost PAWLICA, s.r.o.

Zapsaná MS Praha, odd C vložka 6087

Jednatel/zastoupená Ing. Petr Pawlica, MBA

IČO: 25 68 32 92

Právní forma Společnost s ručením omezeným

Sídlo - ulice Drnovská

Sídlo - č.p. 1118

Sídlo - č.o. 53a

Sídlo - PSČ 16100

Sídlo - město Praha 6 - Ruzyně

Řešitel:

Společnost Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

Jednatel/zastoupená Ing. Marek Světlík, Ph.D.

IČ: 00027031

Právní forma Veřejná výzkumná instituce

Sídlo - ulice Drnovská

Sídlo - č.p. 507

Sídlo - PSČ 16101

Sídlo - město Praha 6

Odpovědný řešitel: Ing. Jiří Souček, Ph.D.

Ostatní členové: Ing. Petr Jevič, CSc.,
Ing. Martin Dědina, Ph.D.,
Ing. Petr Plíva, CSc.,

Obsah

OBSAH	3
1. ÚVOD.....	4
2. STRUČNÉ ZHODNOCENÍ PRŮBĚHU ŘEŠENÍ.....	4
3. CÍL ŘEŠENÍ.....	5
4. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	5
4.1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA.....	5
4.2. EXPERIMENTÁLNÍ SUŠICÍ ZAŘÍZENÍ A POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ.....	12
4.2.1 Sušení v uzavřeném okruhu	13
4.2.2 Sušení ve stacionární vrstvě	14
4.3 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY	16
4.3.1 Výsledky měření v proudu vzduchu - uzavřený okruh.....	16
4.3.2 Výsledky měření ve stacionární vrstvě - otevřený okruh	20
4.3.2.1. Sušení stébelnin.....	20
4.3.2.2. Sušení pilin.....	24
4.3.2.3. Sušení štěpky	27
4.3.2.4. Sušení kompostu	30
5. ZÁVĚR	33
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	36

1. Úvod

Zvyšování podílu využívání biopaliv na výrobě energie v České republice v poslední době narůstá nebývalým tempem. Největší zásluhu na této skutečnosti má dotační politika, díky které se stále větší množství rostlinné biomasy využívá pro přímé spalování a zejména došlo k prudkému nárůstu počtu bioplynových stanic.

Negativním důsledkem této skutečnosti je snížení účinnosti spalování vlivem využívání méně kvalitních surovin a v případě bioplynových stanic omezenou schopností využít energii získanou ve formě tepla. Uplatnění technologií zajišťujících snížení uvedených negativ má na trhu velký potenciál. Pro jejich vývoj je však nutné znát vlastnosti produktů při procesu sušení.

2. Stručné zhodnocení průběhu řešení

Řešení probíhalo v roce 2015 dle plánovaného harmonogramu. Experimentální pokusy byly realizovány na základě teoretických východisek získaných z odborné literatury a zkušeností s experimenty realizovanými na zařízení v minulých letech.

Dodané vzorky zkoumaných materiálů byly podrobeny příslušným analýzám v agrochemické laboratoři VÚZT a následně sušeny v experimentální sušárně při režimech sušení simulujících podmínky praktického provozu. Hlavní akcent byl kladen na posouzení možnosti využití nízkopotenciálního tepla simulujícího odpadní teplo při provozu bioplynových stanic.

Před zahájením vlastních experimentů byly metrologicky ověřeny a zkalibrovány všechny potřebné přístroje a měřicí prvky. V první fázi experimentů byly sušeny vzorky v proudu vzduchu při uzavřeném okruhu. Hlavním cílem těchto měření bylo ověření teoretických předpokladů a správné funkčnosti experimentálního zařízení a všech prvků regulace, měření a záznamu.

Ve druhé fázi byly vybrané vzorky surovin ve stavu partikulárních látek podrobeny experimentálnímu měření v otevřeném okruhu s instalovaným provzdušňovacím modulem. Ten umožňuje měření parametrů sušení pomocí provzdušňování ve stacionární vrstvě při definovaných parametrech.

Výsledky experimentálních měření byly vyhodnoceny a interpretovány ve formě sušících křivek. Na základě získaných poznatků lze posuzovat konkrétní záměry v oblasti využití odpadního tepla k sušení vybraných surovin.

3. Cíl řešení

Cílem řešeného projektu bylo posoudit možnosti využití odpadního tepla pro zvyšování kvality rostlinných surovin sušením a získat tak podklady pro vývoj inovativní technologie na využívání nízkopotencionální tepelné energie.

4. Dosažené výsledky

4.1 Teoretická východiska

Vlastnosti vlhkého materiálu jsou určeny chemickým složením, strukturou a tvarem částic. Z hlediska sušení je základní veličinou popisující daný materiál obsah vody. Voda v materiálu je obecně vázána chemickými a fyzikálními silami. Sušením se dle definice odstraňuje z materiálu pouze voda fyzikálně vázaná. Snižování obsahu chemicky vázané vody je označováno jako dehydratace.

Vnitřní podmínky sušení nelze při současném stavu vědy posoudit jinak než na základě experimentálně stanovených křivek sušení. Skutečné podmínky jsou od laboratorních vždy odlišné rozměrovým měřítkem a tím pádem i gradienty teploty a vlhkosti. Nelze je tedy v laboratorních podmínkách simulovat zcela dokonale. Křivky sušení lze stanovit pro modelová tělesa při nastavení různých vnějších podmínek. Množství takto stanovených křivek sušení je pak třeba převést do praxí ověřených modelů sušení.

Dřevo a rostliny určené pro spalování je v případě možnosti vhodné předsoušet levným odpadním teplem.

Při sušení dochází ke sdílení tepla a přenosu vlhkosti v soustavě vlhký materiál - sušící prostředí.

Kinetika sušení je určena :

- vnitřními podmínkami: sdílením tepla a přenosu vlhkosti uvnitř vysoušeného tělesa,
- vnějšími podmínkami: sdílením tepla a přenosu vlhkosti ve vzduchu a izotermou desorpce určující teplotně vlhkostní vztah na rozhraní vysoušený materiál – vzduch.

Vnitřní podmínky sušení

Rostlinné suroviny na bázi dřevin a bylin určené pro termickou přeměnu se skládají z pevných svazků velkého množství rostlinných buněk trubičkovitého tvaru uspořádaných převážně paralelně k ose kmene nebo rostliny.

Pravidelné přírůstky dřeva tvoří letokruhy, jejichž šířka je ovlivněna vegetačními podmínkami během roku. Ve středu kmene je dřev, při sušení větších kusů dřeva v této části dřevo nejvíce praská. Směrem od středu k obvodu kmene lze pozorovat tenké dřevové paprsky. U staršího kmene jsou rozlišitelné. Vnitřní odumřelá část dřeva, tzv. jádro, které bývá prosyceno tříslovinou, pryskyřicí a barvivy, má nižší obsah vody a obtížněji se suší. Povrchové vrstvy dřevin tvoří kambium, lýko a kůra. Objemová hmotnost dřeva závisí na druhu a stavu dřeva. Obecně lze druhy dřev rozdělit na měkká a tvrdá. Pro účely spalování biomasy se užívá převážně dřevo měkké, obvykle topol.

Vlhkost materiálu je popisována buď procentuálním obsahem, v laboratorní i technické praxi označovaným jako obsah veškeré vody:

$$W = \frac{m_w}{m_s + m_w} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

kde: m_s je hmotnost sušiny (kg)

m_w je hmotnost vody (kg)

Dalším způsobem vyjádření obsahu vody, často používaným zejména v oblasti průmyslového zpracování dřeva, je veličina označovaná jako měrná vlhkost:

$$x_m = \frac{m_w}{m_s} = \frac{W}{(100 - W)} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (2)$$

Platí tedy:

$$W = 100 \cdot \frac{x_m}{(x_m + 1)} \quad (\%) \quad (3)$$

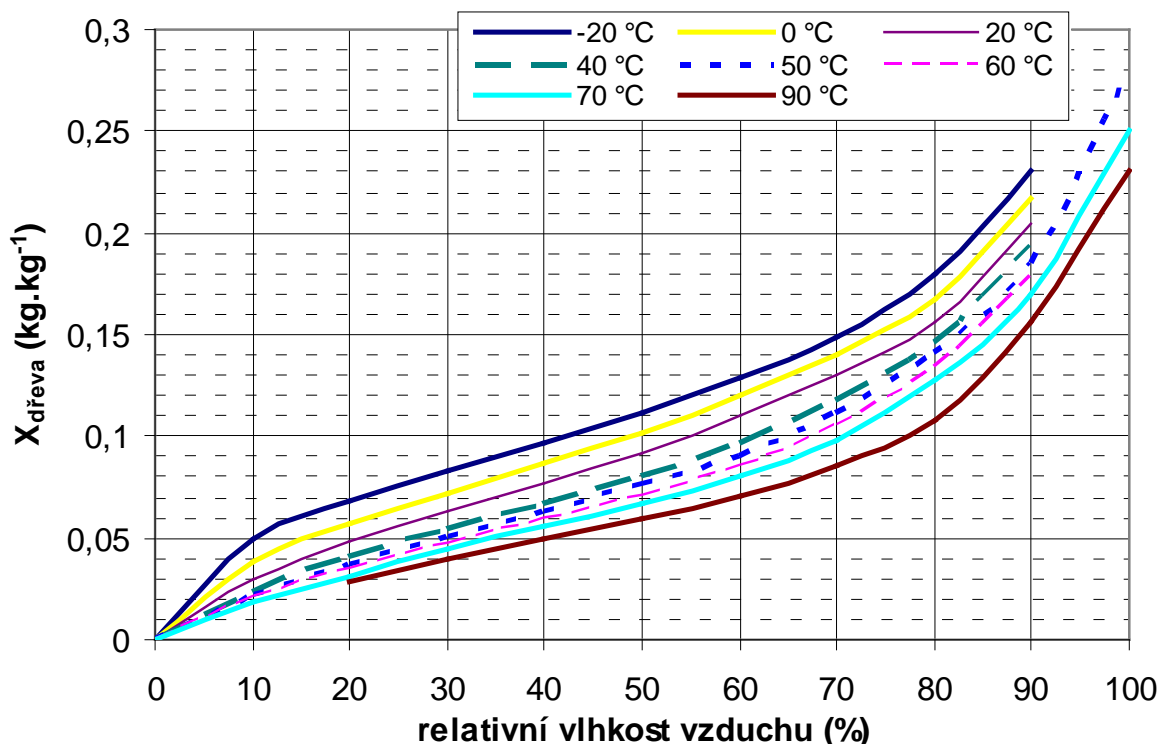
Z hlediska procesů sorpce a desorpce vody je důležitá tzv. mez hygroskopicity. Nad mezí hygroskopicity nedochází ke zpětné sorpci vody, pod mezí hygroskopicity ano. Mez hygroskopicity pro lignocelulozové materiály se nachází přibližně v rozmezí 23 až 29 %.

Voda volná je uložena v buněčných dutinách, při jejím odsoušení nedochází k rozměrovým změnám dřeva. Hodnoty volné vody jsou vyšší než mez hygroskopicity. Voda vázaná se nachází ve stěnách buněk mezi jednotlivými vlákny. Její hodnoty vlhkosti jsou pod mezí hygroskopicity.

Dostupné údaje o křivkách sušení a vlastnostech z hlediska sušení jsou v literatuře zpracovány obvykle z hlediska sušení řeziva. Pro posouzení průběhů sušení štěpky, pilin nebo například řezanky tyto údaje nelze použít.

Vztahy na rozhraní dřevo - vzduch jsou určeny izotermou desorpce vlhkosti.

Rovnovážná vlhkost dřeva je úměrná relativní vlhkosti okolí, se kterým je dřevo v rovnováze. Konkrétní hodnoty závisí na druhu a stavu dřeva a na teplotě, při které je dřevo s okolím v rovnováze. Typické hodnoty měrných vlhkostí dřeva při desorpci vlhkosti jsou pro různé teploty graficky zpracované na obrázku 1. Izotermy desorpce určují vztah na rozhraní vysoušený materiál – vzduch. Průběh izoterm pro ostatní lignocelulozové rostlinné suroviny je velmi podobný.



Obr.1: Izotermy desorpce při různých teplotách

Křivka sušení

Křivka sušení charakterizuje komplexně kinetiku sušení. Je určena časovou závislostí střední integrální měrné vlhkosti z celého vzorku materiálu X_m při sušení za stálých podmínek - teploty, tlaku, rychlosti proudění a vlhkosti sušícího prostředí.

Z křivky sušení je odvozována rychlost sušení N , definovaná jako záporně vzatá derivace hodnot měrné vlhkosti vzorku podle času t .

$$N = -\frac{dx_m}{dt} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

kde: x_m je měrná vlhkost materiálu (kg.kg^{-1})

t je čas (s)

Rychlost sušení se v průběhu sušení mění. Po počátečním úseku ohřevu materiálu dosahuje rychlost sušení maxima a dále monotónně klesá k nule tj. materiál přechází do ustáleného (vysušeného) stavu za daných vnějších podmínek. Rychlost sušení závisí na vnějších podmínkách a na velikosti, tvaru a typu materiálu. Pro charakterizaci vlastností materiálu z hlediska sušení se proto zpracovává v závislosti na měrné vlhkosti materiálu. Rychlost sušení lze navíc zpracovat v bezrozměrném tvaru tj. v poměru k rychlosti sušení volné vodní hladiny tvaru vzorku (resp. zcela mokrého vzorku).

$$N^* = \frac{N}{N_e} \quad (-) \quad (5)$$

kde: $N_{(t)}$ je rychlost sušení materiálu (s^{-1})

N_e je rychlost sušení volné hladiny (s⁻¹)

Závislost relativní rychlosti sušení na měrné vlhkosti je pak teoreticky nezávislá na vnějších podmínkách sušení (parametrech sušícího prostředí), nazývá se zobecněnou křivkou sušení daného materiálu a lze ji použít pro modelování a výpočty parametrů sušícího zařízení.

Tvar zobecněné křivky sušení charakterizuje kromě typu materiálu též jeho velikost a tvar.

Při podrobnějším posuzování parametrů průběhu sušení je nutné použít podrobný postup, který vyžaduje v průběhu experimentu stanovit a sledovat teplotu vzorku T_m . Ta umožňuje, vedle stanovení podmínek, za kterých dochází k nežádoucímu ohřevu vysoušeného materiálu, při komplexním zpracování s rychlostí sušení N i vyhodnocení kinetiky sdílení tepla. To znamená přibližné stanovení hodnoty součinitele přestupu tepla α resp. součinitele přestupu vlhkosti β .

Pokud se teplo dodané do materiálu spotřebuje pouze na odpar vlhkosti platí

$$\alpha \cdot S(T_v - T_m) = N \cdot m_s \cdot l_w \quad (\text{J} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6)$$

Kde: S je plocha povrchu vzorku na níž dochází k výměně tepla a vlhkosti mezi materiálem a sušícím prostředím, (m²)

T_v je teplota vzduchu (K)

T_m je teplota materiálu (K)

N je rychlost sušení, (s⁻¹)

m_s je hmotnost sušiny (kg)

l_w je měrné výparné teplo vody při dané teplotě materiálu. (J · kg⁻¹)

Z toho

$$\alpha = \frac{N \cdot m_s \cdot l_w}{S \cdot (T_v - T_m)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (7)$$

Podobně platí pro součinitele přestupu vlhkosti β

$$\beta = \frac{N \cdot m_s}{S \cdot (x_m - x_v)} \quad (\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (8)$$

kde: x_v je měrná vlhkost vzduchu (kg · kg⁻¹)

x_m je měrná vlhkost materiálu (kg · kg⁻¹)

Měrnou vlhkost sušícího prostředí na povrchu vzorku lze odvodit z teploty vzorku a izotermy desorpce vlhkosti.

V případě odparu z volné vodní hladiny pak platí

$$\alpha = \frac{N_e \cdot m_s \cdot l_w}{S \cdot (T_v - T_e)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (9)$$

kde: T_e je adiabatická teplota odparu z volné vodní hladiny (určená pouze parametry sušícího vzduchu, v našem případě teplotou T_v a měrnou vlhkostí x_a) (K)

dle vztahu:

$$T_e = \frac{T_v - l_w}{c_v \cdot (x_e - x_v)} \quad (\text{K}) \quad (10)$$

kde: x_e je měrná vlhkost nasyceného sušicího prostředí při teplotě povrchu materiálu (resp. adiabatické teplotě T_e , která přibližně odpovídá naměřené teplotě v úseku stálé rychlosti sušení).

Porovnáním vztahů (7) a (9) lze určit poměr měření stanovené rychlosti sušení N a ekvivalentní rychlosti sušení při odparu z volné vodní hladiny N_e

$$\frac{N}{N_e} = \frac{T_v - T_m}{T_v - T_e} \quad (-) \quad (11)$$

Proto je vhodné doplnit křivky sušení záznamem teplot materiálu. K zobecněným křivkám sušení lze teploty materiálu T_m zpracovat v bezrozměrném tvaru tj. jako relativní teplotu materiálu:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_e}{T_v - T_e} \quad (-) \quad (12)$$

Kde: T_v je teplota sušicího prostředí (příp. teplota materiálu po dosažení suchého stavu) (K)

T_e je adiabatická teplota odpařování z volné vodní hladiny. (K)

Výsledné hodnoty bezrozměrné teploty jsou v intervalu od 0 do 1, tj. pro $T_m = T_e$ je $T_m^* = 0$ a pro $T_m = T_v$ je $T_m^* = 1$.

Získané hodnoty součinitele přestupu tepla α a vlhkosti β představují střední integrální hodnoty přes celý povrch vzorku. Při sesychání materiálu se mění jak efektivní plocha S tak i její tvar a tím i hodnoty součinitelů α a β . Základní nepřesností je pak rozdíl mezi místně měřenou teplotou T_m a střední integrální teplotou povrchu vzorku, pro které jsou uvedené vztahy odvozeny.

Při prostupu platí, že průtok suchého vzduchu M_v je určován z naměřené střední rychlosti w , teploty T_v a vlhkosti x_v vzduchu v krátkém výstupním potrubí, průřezu S dle zjednodušeného vztahu pro ideální plyn

$$M_v = \frac{w \cdot S \cdot (P_o - P_w)}{R_{sv} \cdot (T_v + 273,15)} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (13)$$

Kde: S je průřez (m^2)

(v případě realizovaných měření $0,00622 \text{ m}^2$)

P_o je atmosférický tlak (Pa)

R_{sv} je měrná plynová konstanta suchého vzduchu ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

P_w je tlak vodních par na výstupu (Pa)

T_v je teplota vzduchu (K)

Tlak vodních par na výstupu je určen: z relativní vlhkosti vzduchu a jeho teploty T_v dle vztahu

$$P_w = RH \cdot P_{n(T_v)} \quad (\text{Pa}) \quad (14)$$

Kde: RH je relativní vlhkost vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

T_v je teplota vzduchu (K)

$P_{n(T_v)}$ je tlak nasycených par při měřené teplotě T_v (Pa)

Z hodnot průtoku vzduchu a tlakové ztráty při průchodu vrstvou vysoušeného materiálu s roštem lze odvodit hodnoty tvarového součinitele proudění ξ vystupujícího ve vztahu pro mezi tlakovou ztrátou Δp .

Hydraulický odpor při průtoku plynu vrstvou je vyjadřován ve tvaru:

$$\Delta p = \frac{3 \cdot \xi \cdot w_e \cdot \rho_v \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (\text{Pa}) \quad (15)$$

Kde: w_e je mimovrstvová rychlost proudění ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(mimovrstvová rychlost proudění w_e je určena z hodnoty celkového průtoku vzduchu a celkové plochy průřezu boxu cca $0,25 \text{ m}^2$)

ξ je součinitel hydraulického odporu (-)

(je určován experimentálně v závislosti na mimovrstvové rychlosti proudění charakterizované Reynoldsovým číslem)

ρ_v je hustota vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

ε je mezerovitost (-)

Mezerovitost je v odborné literatuře většinou vyjadřována:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (-) \quad (16)$$

Kde: V je objem celé hmoty (m^3)

V_p je objem pórů (m^3)

Vnější podmínky

Sušící prostředí představuje směs par odpařované vlhkosti se suchým plynem, kterým je obvykle vzduch. Sušící prostředí je charakterizováno stavem a transportními vlastnostmi. Stav sušícího prostředí je určen základními termodynamickými proměnnými: tlakem, teplotou a složením. Transportní vlastnosti sušícího prostředí jsou např. popsány viskozitou, tepelnou vodivostí a difuzními koeficienty jednotlivých složek.

Přenos tepla a vlhkosti v sušícím prostředí tvoří vnější podmínky sušení.

Pro proces sušení platí zákony termodynamiky nevratných dějů. Toky hmoty a energie jsou makroskopicky spojité veličiny, stejně tak i potenciály, které jsou hnací silou těchto dějů. Vtah mezi toky a gradienty potenciálů je lineární a v celém prostoru platí zákon lokální termodynamické rovnováhy. To platí i na rozhraní vysoušeného materiálu a sušícího prostředí tj. teploty a hodnoty potenciálu přenosu vlhkosti jsou na rozhraní vždy stejné pro povrch materiálu a nejbližší vrstvu sušícího prostředí, obvykle proudícího po povrchu materiálu.

Kinetika procesu je určena vzájemnou interakcí sušícího prostředí a vysoušeného materiálu. Tato interakce je popsána vzájemným pohybem resp. prouděním sušícího prostředí po povrchu tělesa vysoušeného materiálu, vzájemným sdílením tepla a vlhkosti.

Sušení je procesem současného sdílení tepla a vlhkosti mezi materiálem a sušícím prostředím. V každém elementárním objemu i v celku platí základní bilanční vztahy.

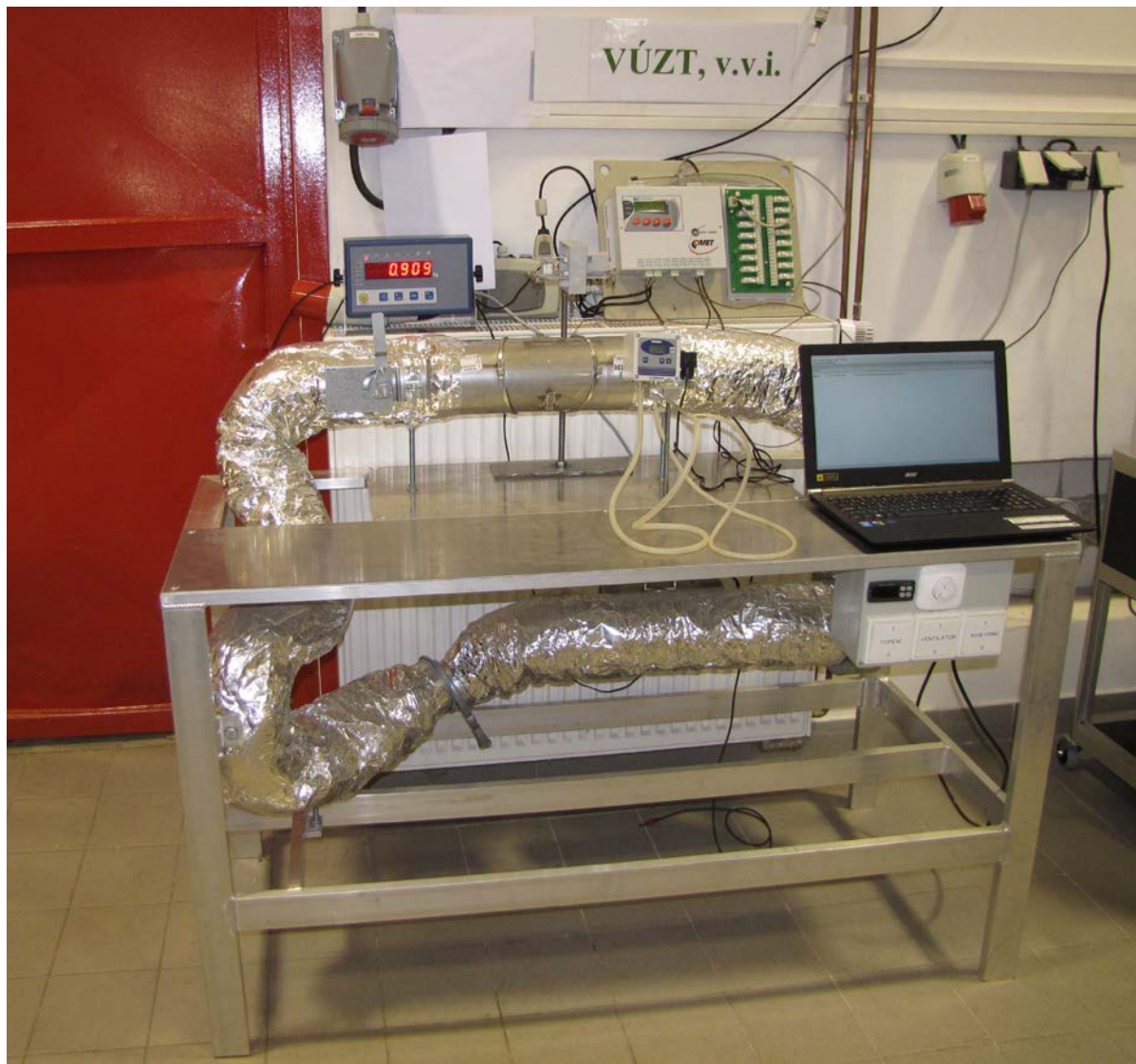
V případě sušení profukováním navrstveného materiálu tvoří soustava materiálu a sušícího prostředí disperzní systém.

Disperzní systém se tedy skládá nejméně ze dvou druhů hmoty, z nichž jeden je rozptýlen ve druhém ve formě větších nebo menších částic.

V souladu s názvoslovím přijatým v chemické termodynamice se disperzní systémy, které jsou tvořeny plynným disperzním prostředím a tuhým disperzním podílem, vyskytující se ve formě částic určité velikosti, nazývají heterogenní disperzní soustavy plyn – tuhé částice.

4.2. Experimentální sušicí zařízení a použité metody měření

Pro experimentální stanovení sušících křivek zkoumaných vzorků byla použita experimentální sušárna VÚZT, jejímž základem je vzduchotechnický okruh s radiálním ventilátorem a regulovatelným elektrickým ohřevem.



Obr. 2: Experimentální zařízení pro měření sušení

Vzduchotechnický okruh je alternativně otevřený nebo částečně či zcela uzavřený. Lze jej využít k sušení jednotlivých částic materiálu jako simulace kontinuálního sušení (bubnové sušárny, pásové sušárny, sesypné sušárně atd.) a nebo pro simulaci sušení materiálu ve stacionární provzdušňované vrstvě.

4.2.1 Sušení v uzavřeném okruhu

Při režimu sušení v uzavřeném okruhu je sušený vzorek ofukován proudem vzduchu, čímž dochází k prostupu vlhkosti z prostředí s vyšším obsahem vody (ze vzorku) do prostředí s nižším obsahem vody (do proudícího vzduchu). Vzorek je v průběhu experimentu umístěn v pracovní části okruhu na závěsu připevněném k tenzometrické váze VÚZT PV1. Tou je měřena hmotnost vzorku v průběhu měření. Měřicí rozsah váhy je $200 \pm 0,01$ g a měřená hmotnost je pomocí převodníku SENSOCAR SC-A1 snímán a zeznamenáván měřicí ústřednou COMET MS6D. Signál vah může vzhledem k velmi nízké hmotnosti závěsu i vzorku obsahovat šum vyvolaný aerodynamickým působením proudícího vzduchu. V průběhu sušení vlivem odpařování vody hmotnost vzorku průběžně klesá a v situaci, kdy je vzorek vysušen (respektive jeho obsah vody je v rovnovážném stavu s okolním vzduchem), zůstává jeho hmotnost konstantní.

Rychlost proudění vzduchu v celé trati je nastavitelná pomocí škrticí klapky. Rychlost proudění lze v pracovní části případně ovlivnit i vestavbou (např. zúžením prostoru, které zvyšuje rychlost proudění). Rychlost proudění je měřena pomocí Pitotovy trubice a diferenciálního tlakového převodníku Greisinger GMUD MP-F s měřicím rozsahem - 1,000..1,00 \pm 0,008 mbar.

Teplotu vzduchu lze plynule regulovat pomocí PID mikroprocesorového regulátoru TLK 39 a 3 topných těles 500 W do 150 °C s přesností \pm 1°C. Teplota sušícího vzduchu je měřena termočlánekem typu T. Všechna uvedená měřidla jsou připojena do měřicí a záznamové ústředny COMET MS6D stejně jako měření hmotnosti. V případě potřeby je na ústřednu možné připojit termočlánek typu K nebo T a měřit i teplotu na povrchu nebo uvnitř měřeného vzorku rovněž s připojením na měřicí ústřednu.

Vlhkost sušícího vzduchu je v průběhu měření kontrolována úrovní otevření nebo uzavření vzduchotechnického okruhu a je měřena v proudu odpadního vzduchu vlhkoměrem Comet TR311.

Připravený vzorek je bezprostředně po dokončení zavěšen na závěs vah do proudu vzduchu o předem nastavených stálých parametrech (teplota, vlhkost a rychlost proudění).

Kromě hmotnosti vzorku je sledována teplota proudícího vzduchu, relativní vlhkost odpadního vzduchu z okruhu a rychlost proudění. Teploty jsou měřeny termočlánekem typu T. Všechny údaje jsou on-line snímány s nastaveným intervalem pomocí ústředny COMET MS6D při on-line propojení s PC nebo v záznamovém režimu s následným exportem dat do PC. Data jsou následně zpracována pomocí standardní uživatelské platformy (MS Excel).

4.2.2 Sušení ve stacionární vrstvě

Měření sušení ve stacionární vrstvě je realizováno pomocí otevřeného okruhu doplněného válcovým modulem pro měření ve vrstvě. Modul je složen ze spodní válcové části opatřené dnem a postranním otvorem určeným náustkem pro připojení přívodu regulovaného sušícího vzduchu vrchní otvor o průměru 350 mm je určen pro nasazení roštů a propojovacích válcových částí. Propojky a rošty lze libovolně kombinovat a dosáhnout tak potřebné výšky měřených vrstev. Propojovací části jsou opatřeny průchodkami pro vkládání čidel měřících přístrojů. V případě, že nejsou využity, je možné jejich vzduchotěsné zaslepení.

Celý modul je zakryt vrchní kuželovou částí, která se rovnoměrně zužuje do výdechové trubice opatřené přístupovým otvorem pro měření parametrů výstupního vzduchu. Spoje jednotlivých částí jsou vzájemně utěsněny aby nedocházelo k únikům sušícího vzduchu mimo výdechovou trubici.

V průběhu měření se do prostoru pod roštem přivádí z otevřeného okruhu experimentální sušárny regulovaný sušící vzduch s nastavenými a měřenými parametry stejně jako při měření v uzavřeném okruhu. Průtok sušícího vzduchu je určen nastavením škrtkové klapky, výkonem ventilátoru, aerodynamickým odporem vrstvy materiálu s rošty. Přídavná regulace je možná pomocí odbočení části vzduchu. Odbočovací otvor a jeho aerodynamický odpor tvoří bypass k aerodynamickému odporu vrstvy materiálu s roštem. Skutečná teplota provzdušňujícího vzduchu je určena nastavením regulátoru, ztrátami přes povrch přívodních potrubí a stěn prostoru pod roštem zařízení a je měřena termočlánkem typu T v podroštovém prostoru.

V prostoru nad roštem je umístěn vysoušený materiál ve vrstvách s tím, že na každou vrstvu jsou vždy rozprostřeny termočlánky pro měření teploty v příslušných vybraných místech. V praxi to znamená, že je nejprve na rošt rozprostřena 1. vrstva vlhkého materiálu na ní 3 termočlánky, pak je na ně rozprostřena 2. vrstva a na ní opět 3 termočlánky atd. Každá trojice termočlánků tak reprezentuje teplotu nad určitou vrstvou v příslušné výšce.

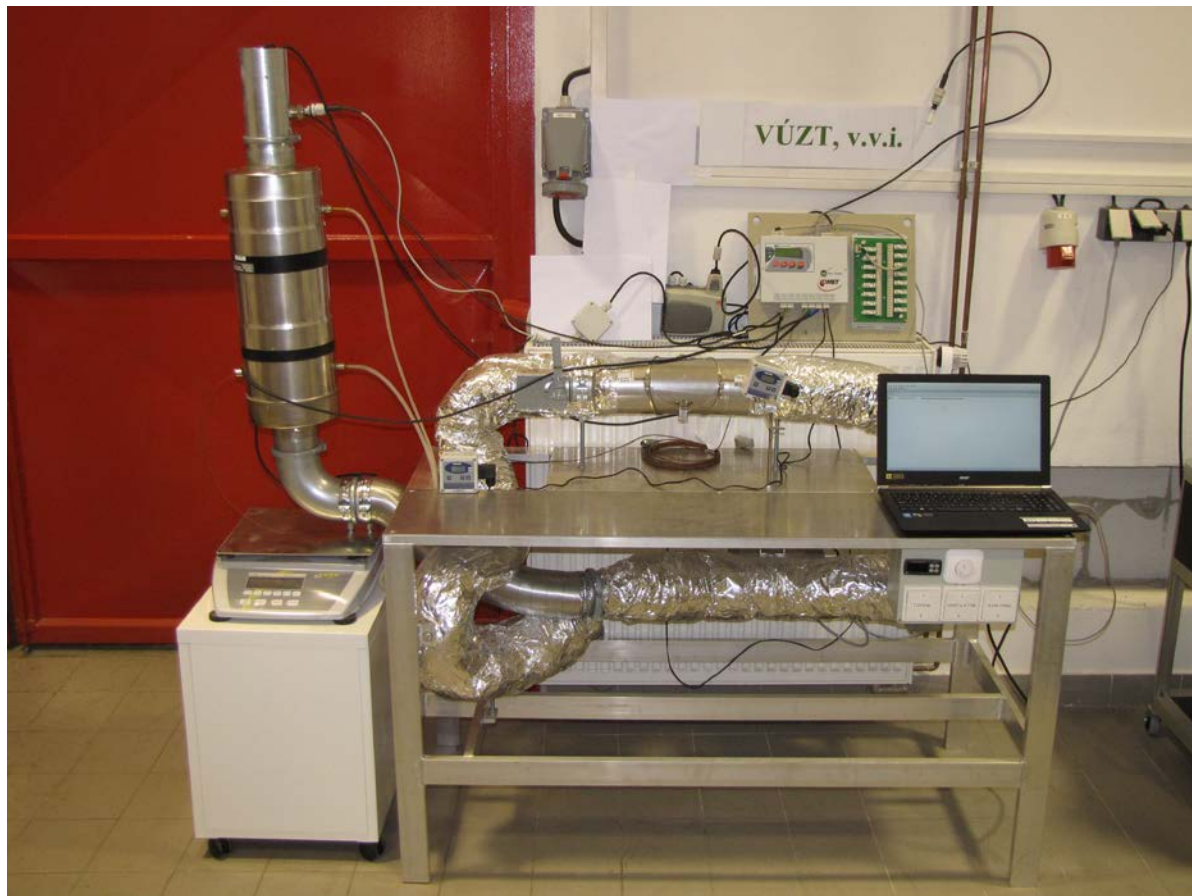
Teploty nad jednotlivými vrstvami byly měřeny plášťovaným termočlánkem typu K \varnothing 0,25 mm s časovou konstantou < 1 s. Obdobným termočlánkem typu K \varnothing 1 mm je měřena teplota sušícího vzduchu T_v pod roštem. Vlhkost sušícího vzduchu nasávaného do sušící experimentální tratě byla měřena převodníkem vlhkosti testo 6651 s měřicím rozsahem $-20..70 \pm 0,2$ °C a $0..100 \pm 1,7$ % RV. Rychlost proudění vzduchu na výstupu je měřena pomocí Pitotovy trubice a diferenciálního tlakového převodníku Greisinger GMUD MP-F s měřicím rozsahem $-1,000..1,00 \pm 0,008$ mbar.

Celý modul je umístěn na tenzometrické váze KERN FTC 60K2 s měřicím rozsahem $60 \pm 0,002$ kg. V průběhu měření je rovněž sledována velikost tlakové ztráty v provzdušňovaném materiálu s využitím výměnných diferenciálních tlakových převodníků Greisinger GMUD MP-F s měřicím rozsahem $-1,000..1,00 \pm 0,008$ mbar, Greisinger GMUD MP-F s měřicím rozsahem $-10,00..10,00 \pm 0,08$ mbar nebo Greisinger GMUD MP-S s měřicím rozsahem $-100,0..100,0 \pm 0,6$ mbar dle aktuální potřeby a vlastností provzdušňovaného materiálu.

Stejně jako při měření v uzavřeném okruhu jsou všechny údaje on-line snímány s nastaveným intervalem pomocí ústředny COMET MS6D při on-line propojení s PC nebo v záznamovém režimu s následným exportem dat do PC. Data jsou následně zpracována pomocí standardní uživatelské platformy (MS Excel).

Při nízkoenergetickém dosoušení surovin pro výrobu bioenergetických produktů je velmi efektivní princip profukování materiálu uloženého ve vrstvě. Prakticky všechny typy

rostlinných surovin vhodných pro sušení ve stacionární vrstvě patří do kategorie sypkých hmot, jejichž struktura má porézní charakter a umožňuje tudíž prostupnost sušicímu médiu. Přiměřeně vysoká vrstva materiálu zároveň zajišťuje efektivní využití tepla obsaženého v médiu a jeho vlhkostní jímavosti. Zařízení pro způsob měření parametrů sušení materiálu ve vrstvě je znázorněno na obrázku 3.



Obr. 3: Modul pro měření nízkoenergetického sušení ve vrstvě

4.3 Získané výsledky

U měřených vzorků byly agrochemickou laboratoří VÚZT stanoveny jejich vlastnosti důležité z hlediska energetického využití.

Sušina materiálu byla stanovena laboratorně podle ČSN 44 1377:1978.

Hodnota spalného tepla a výhřevnost materiálu byla stanovena kalorimetricky podle ČSN ISO 1928:1999.

Popel byl stanoven laboratorně podle ČSN ISO 1171:2001, síťové analýzy podle ČSN ISO 9276-1:1994.

Nejistoty měření jsou stanoveny podle dokumentů ČIA Evropská spolupráce pro akreditaci EA 4/02. Měřicí přístroje splňují podmínky ČSN EN ISO/IEC 17 025.

Z důvodů větší přehlednosti nejsou ve zprávě uvedeny všechny realizované experimenty a jejich výsledky.

4.3.1 Výsledky měření v proudu vzduchu - uzavřený okruh

Při měření křivek rychlosti sušení byl připraven vzorek, jehož velikost byla omezena velikostí sušící komory a potřebou, aby kolem vzorku mohl bez problémů proudit sušící vzduch. Připravený vzorek byl zvážen na laboratorních analytických vahách a byly změřeny jeho fyzické rozměry posuvným měřítkem. Pod povrch vzorku byl vložen termočlánek,

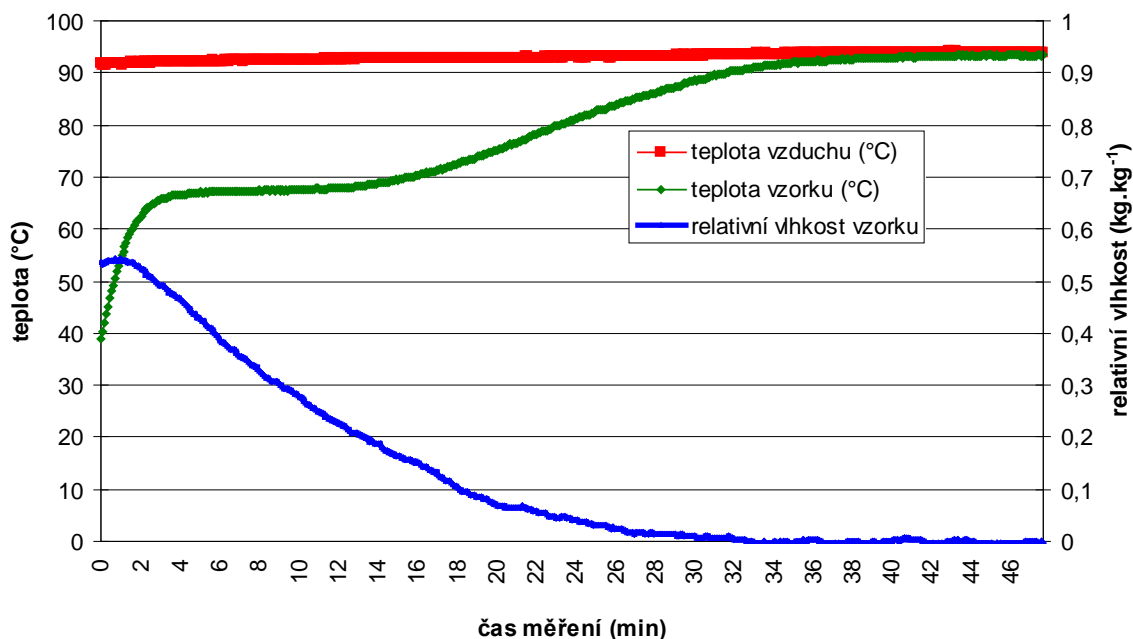
aby bylo možné pořídit záznam teploty vzorku. Vzorek byl ihned po přípravě vložen do experimentálního zařízení s nastavenými parametry a ustálenými podmínkami. Záznam hodnot začal bezprostředně po vložení vzorku do sušárny. Měřené teploty bylo možné sledovat on-line na PC připojeném k měřicí ústředně. Vzorek materiálu byl považován za vysušený, pokud se teplota sušícího vzduchu a teplota měřená uvnitř vzorku po dobu alespoň 10 minut shodovala přesností 0,1 °C.

Po ukončení experimentu byl vzorek zvážen a následně vložen do laboratorní sušárny, kde byl ponechán po dobu 4 hodiny při teplotě 105 °C a po vychladnutí v exsikátoru opět zvážen. Tímto způsobem bylo ověřeno, zda byl vzorek v průběhu experimentu skutečně vysušen.

Při každém měření byl stanoven záznam průběhu relativní vlhkosti vzorku přepočítáním záznamu tenzometrické váhy.

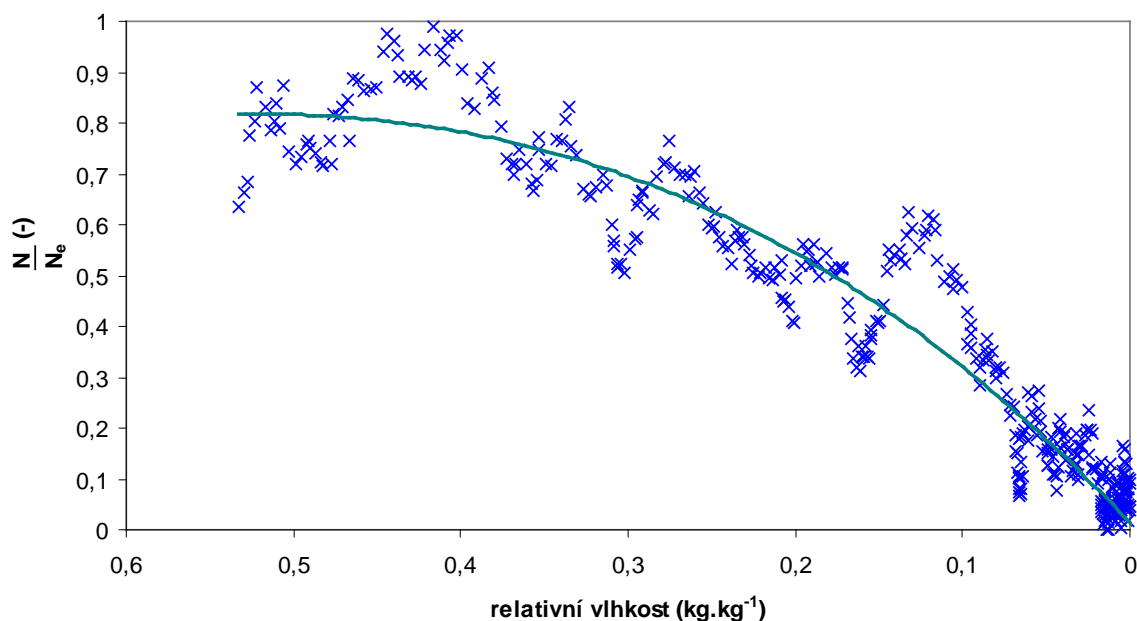
Průběh teploty sušícího média – vzduchu – byl udržován na nastavené hodnotě pomocí regulátoru s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$. Teplota vzorku se zvyšovala z teploty při vsazení do zařízení až na hodnotu stejnou jako byla teplota sušícího vzduchu (viz graficky znázorněný průběh na obrázku 4).

Ověření zařízení a následné pilotní zkoušky byly realizovány na čerstvých vzorcích rychle rostoucích dřevin - topolů - určených pro energetické využití přímým spalováním. Průměr vzorků byl 12 mm a délka 20 mm. Hmotnost sušiny vzorků se pohybovala mezi 1 a dvěma gramy. V daném případě (obr 4) byla hmotnost sušiny 1,32 g.



Obr. 4: Grafické znázornění průběhu teploty sušícího vzduchu a teploty a relativní vlhkosti vzorku – topol čerstvý, kolmý průřez větví, celý profil.

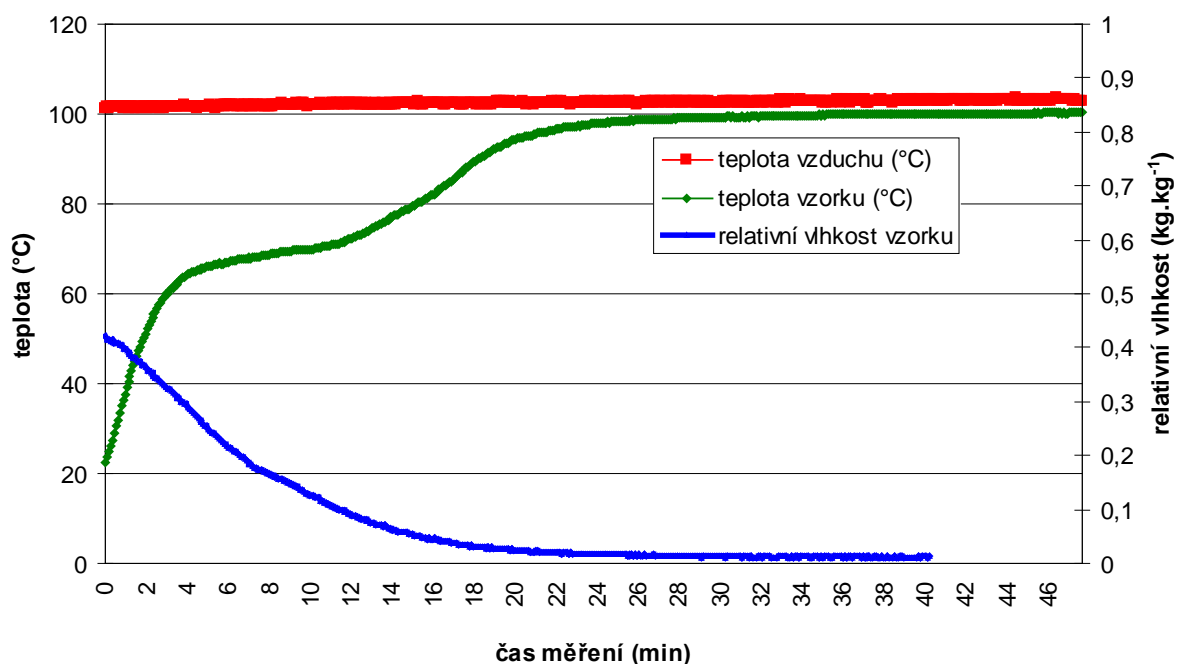
Na obrázku 5 je průběh zobecněné křivky rychlosti sušení přepočítaný podle vzorců (10) a (11).



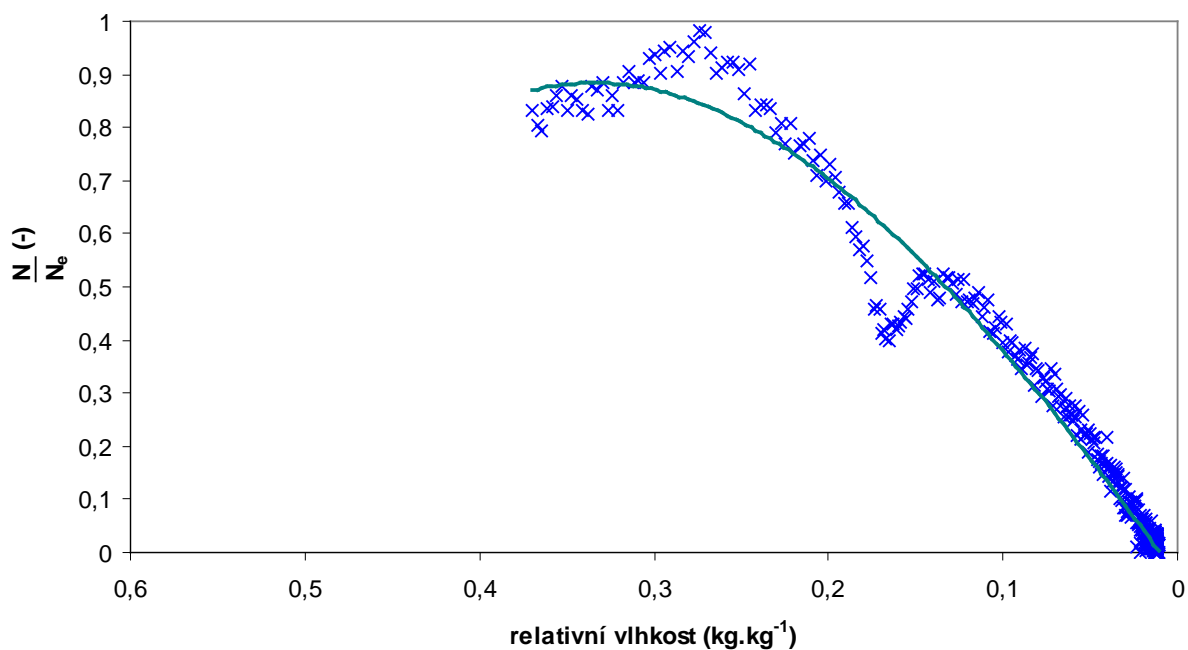
Obr. 5: Zobecněná křivka rychlosti sušení – topol čerstvý, kolmý průřez větví, celý profil

Na obrázcích 6 a 7 jsou grafy s výslednými charakteristikami sledovaných materiálů. Naměřená data byla podle výše uvedených vztahů v programu MS Excel.

Stejným způsobem byly stanoveny vlastnosti sušení topolu skladovaného v období březen – prosinec na venkovní nezastřešené ploše. Průměr vzorku byl 20 mm a délka 50 mm. Hmotnost sušiny byla 3,02 g.

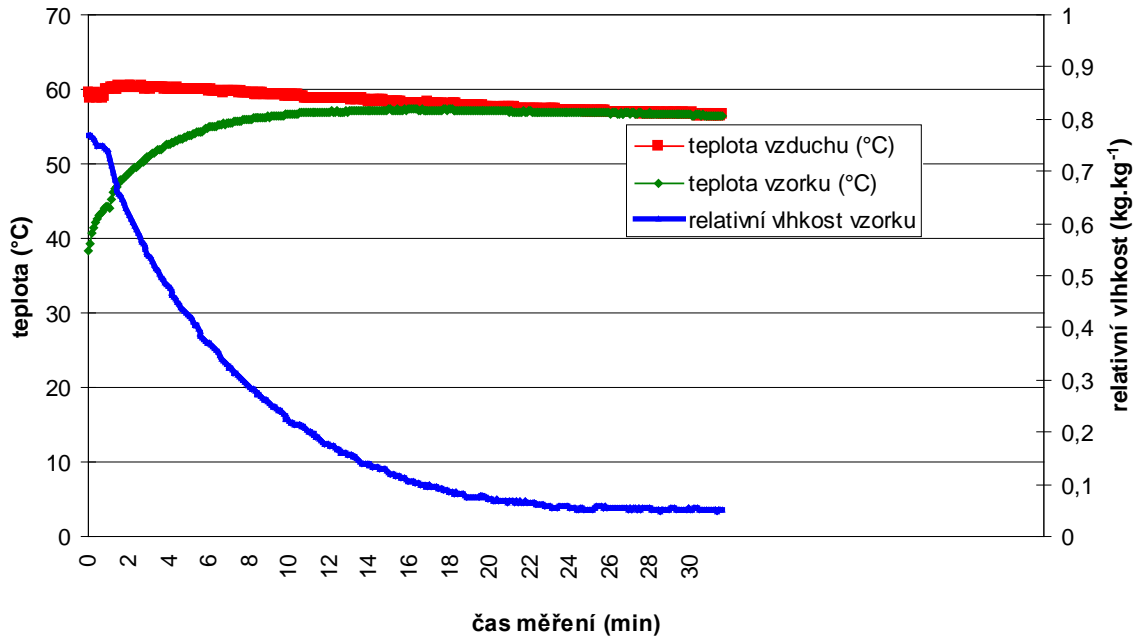


Obr. 6: Grafické znázornění průběhu teploty sušícího vzduchu a teploty a relativní vlhkosti vzorku – topol skladovaný, kolmý průřez větví, celý profil.

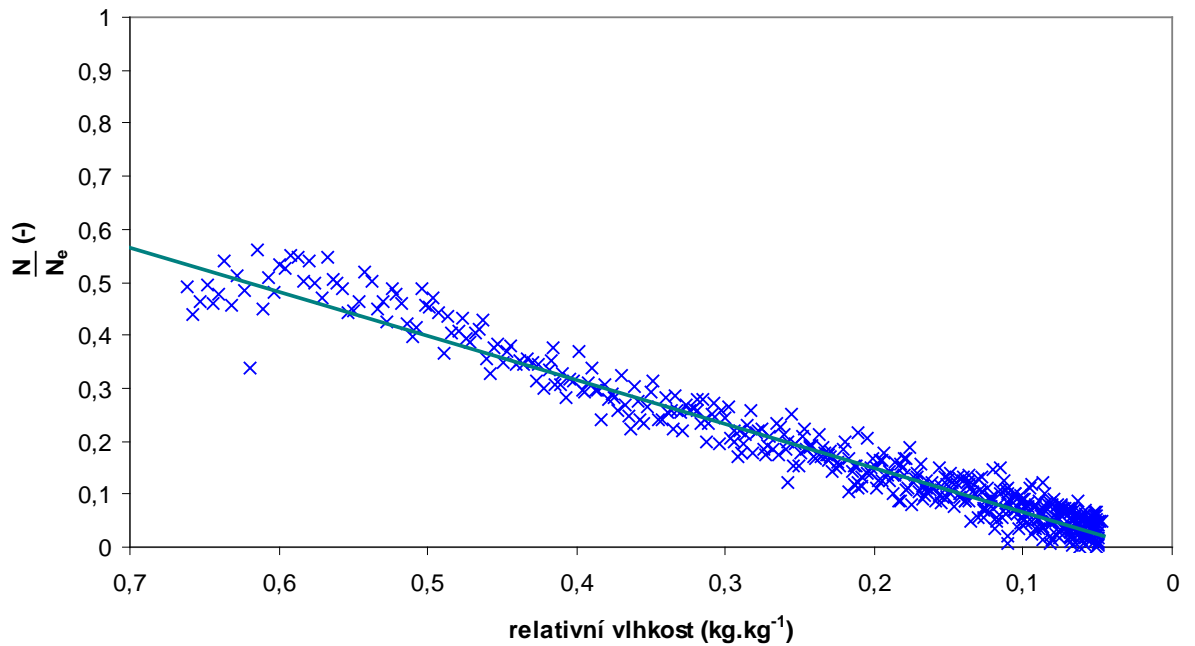


Obr. 7: Zobecněná křivka rychlosti sušení – topol skladovaný, kolmý průřez větví, celý profil.

Dalším sledovaným materiálem byla dřevní štěpka, opět topolová, čerstvá. Štěpka byla přetříděna na laboratorním síťovacím stroji (3D prosévače). Měřená frakce byla nadsítné ze síta 5 mm z podsítného síta 7 mm. Pro přípravu vzorků byla použita síta z děrovaného plechu s kruhovými otvory. Hmotnost měřeného vzorku byla 4,3 g. Průběh teplot a relativní vlhkosti vzduchu je graficky znázorněn na obrázku 8.



Obr. 8: Grafické znázornění průběhu teploty sušícího vzduchu a teploty a relativní vlhkosti vzorku – topol, štěpka 5 – 7 mm.



Obr. 9: Zobecněná křivka rychlosti sušení – topol, štěpka 5 – 7 mm.

Z průběhu křivek je patrné, že s klesající vlhkostí materiálu se podmínky sušení u všech forem materiálu zhoršují. Vyšší poměr N ku N_e je i pro nižší hodnoty relativní vlhkosti u staršího, půl roku skladovaného dřeva. Horší parametry vykazuje průběh sušení štěpky. To je dáno větším počtem částic, které byly ve vrstvě položeny na miskovém závěsu a nedocházelo tudíž k dokonalému obtékání všech částic sušícím médiem.

4.3.2 Výsledky měření ve stacionární vrstvě - otevřený okruh

4.3.2.1. Sušení stébelnin

Vysoký potenciál pro využití odpadního tepla na snižování obsahu vody vykazují stébelnaté materiály. Jejich následné využití je v oblasti energetického využití i v agrárním sektoru především jako konzervované objemové krmivo. Nízký obsah vody umožňuje dlouhodobé skladování s omezením rizika výskytu biodegradabilních procesů a zvyšuje kalorickou hodnotu surovin. Jako vhodný zásupce uvedené skupiny surovin byla zvolena chrastice rákosovitá. Jedná se o víceletou travu se zvýšeným výnosovým potenciálem.

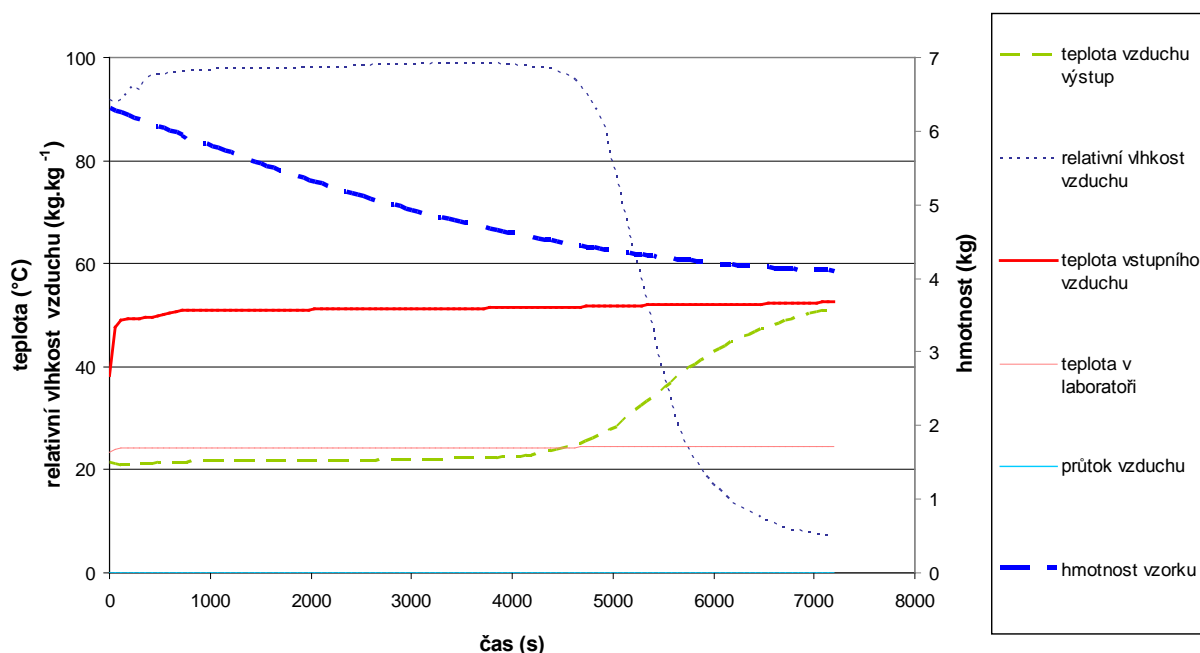
Při přípravě experimentů byla chrastice nařezána na řezanku se střední délkou částice **6,23 mm**.

Jako simulace sušení teplem byly vzorky provzdušňovány ustáleným proudem ohřátého vzduchu z otevřeného okruhu o stálé teplotě 73 a 52 °C. Záznamy průběhů teplot, relativní vlhkosti vzduchu na výstupu a obsahu vody v sušeném materiálu jsou zobrazeny na obr. 10.

Při zakládání experimentu byla chrastice uložena v sušicím modulu ve 4 vrstvách vysokých 10 cm. Mezi vrstvy byla vložena čidla pro měření teploty (termočlánky). Do celkové bilance byly pro přehlednost hodnoty udávané jednotlivými čidly v materiálu uváděny jako průměrné hodnoty dané vrstvy a v grafickém znázornění se objevují jako jedna křivka. Odečítání a ukládání dat probíhalo on-line během experimentu. Příklad graficky znázorněného průběhu vybraných veličin je uveden na Obr. 10.

Spalné teplo vzorku stanovené pomocí kalorimetru bylo **17,626 MJ.kg⁻¹**. Výhřevnost vzorku byla (při stanovení výpočtem podle ČSN ISO 1928:1999) **9,491 MJ.kg⁻¹**.

Obsah popele ve vzorku byl **4,74 %** v sušině. Objemová hmotnost materiálu byla **154,6 kg.m⁻³** a průměrný obsah vody **35,1 %**.

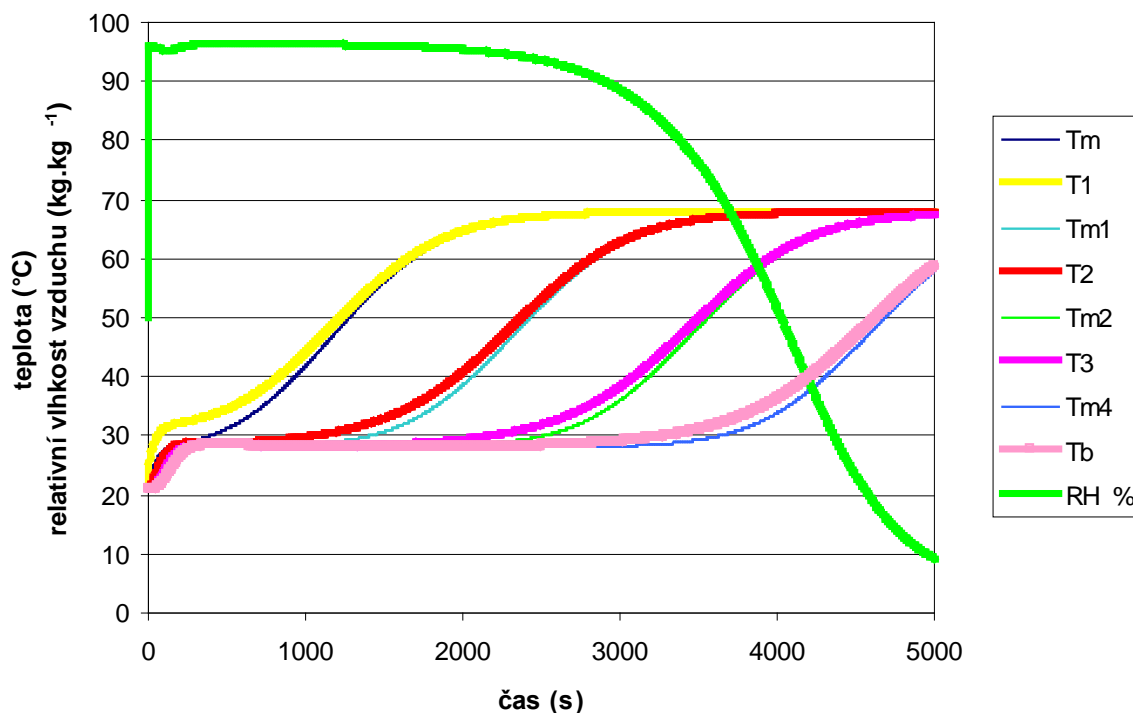


Obr. 10.: Grafický znázorněný záznam průběhu teplot, relativní vlhkosti vzduchu na výstupu a hmotnosti vzorku při sušení chrastice rákosovité.

Průměrná měrná energie spotřebovaná na odpar vody byla **8,405 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **0,35 m³.s⁻¹**.

Pro stanovení vlastností při nižší teplotě sušení byla teplota sušicího vzduchu nastavena na **52 °C**. Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí **21,6 až 51,3 °C**. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí **7,1 až 98,9 %**.

Na Obr. 11 je uveden příklad záznamu čidel v jednotlivých vrstvách provzdušňovaného materiálu.

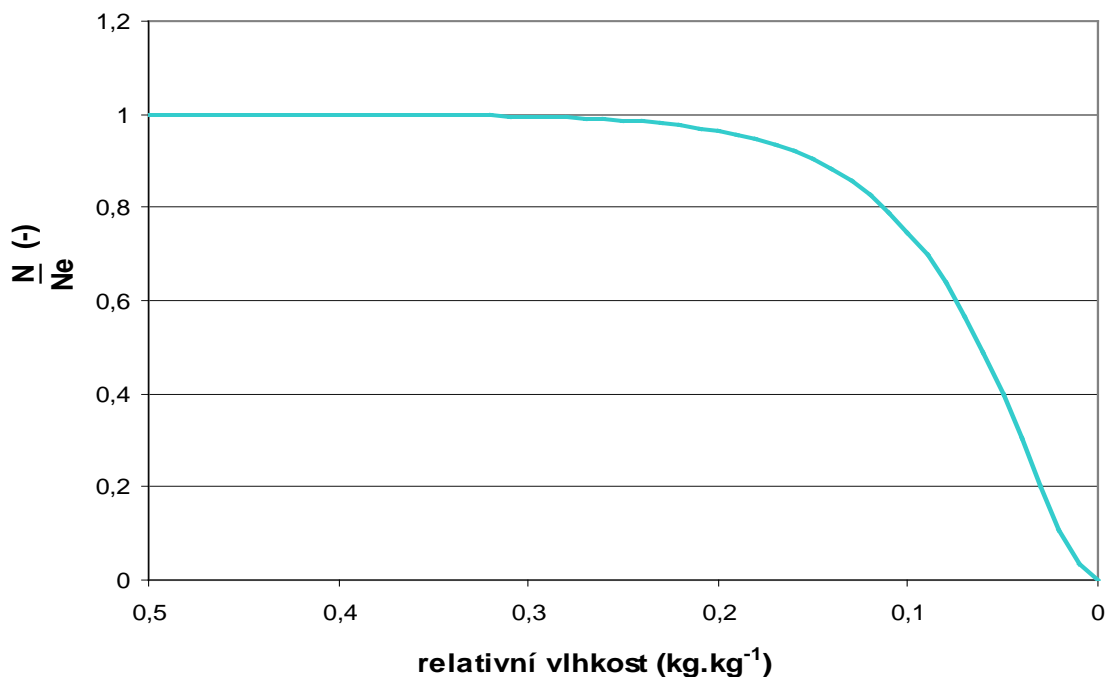


Obr. 11.: Graficky znázorněný záznam teplot v jednotlivých vrstvách provzdušňovaného materiálu a relativní vlhkosti vzduchu na výstupu v průběhu sušení

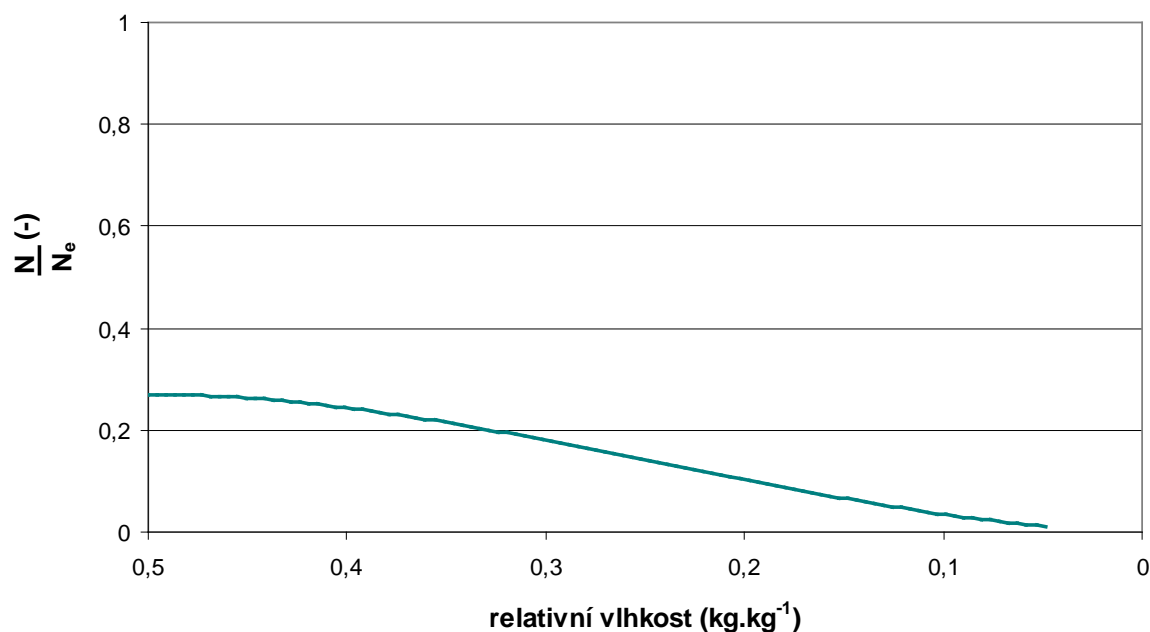
Z naměřených teplot v jednotlivých výškách vrstvy vyplývá, že v průběhu sušení probíhá odsoušení vrstev materiálu postupně s tím, že vyšší vrstvy jsou vystaveny vzduchu se zvýšenou vlhkostí v důsledku odparu vody v nižších vrstvách. Projevuje se to vyšší hodnotou “adiabatické” teploty odparu tj. teploty v úseku stálé rychlosti sušení, kdy teplo dodané vzduchem se zcela spotřebuje na odpar a k ohřevu materiálu v ten okamžik prakticky nedochází.

V nízkých vrstvách při laboratorním experimentu je zvyšování zmíněné “adiabatické” teploty odparu velmi malé, při skutečných výškách vrstvy bude výraznější (ve vysokých vrstvách např. v seníku nebo při profukování v síle může toto zvýšení teploty dosáhnout hodnot, při nichž dochází k “mikrobiologickému” vývinu tepla, jehož výsledkem může být i samovznícení materiálu.

Růsty teplot při dosoušení jednotlivých vrstev materiálu jsou pozvolné a odpovídají křivce sušení materiálu.



Obr. 12.: Bezrozměrná křivka sušení chrastice rákosovité – zimní sklizeň



Obr. 13.: Bezrozměrná křivka sušení chrastice rákosovité – letní sklizeň (červen – červenec)

Výsledků experimentů graficky znázorněných pomocí bezrozměrných křivek sušení na obrázcích Obr. 12 a Obr. 13 vyplývá, že syrová, v brzkém termínu sklízená biomasa na bázi stébelnatých materiálů vykazuje podobně jako syrová dřevní biomasa při sušení horší parametry. Hmota, která je sklížena v pozdějším termínu (nejdříve ve fázi zralých semen) vysychá rychleji a je tudíž méně náročná na spotřebu času a energie. Sušení později sklízené bylinné biomasy je efektivnější. Tato efektivnost je patrnější zejména v případě, kdy je přirozeně částečně proschlý materiál opět namočen (simulace navlhnutí vlivem deště, sněhu, mlhy atd.). Z křivky na obrázku 12 je patrné, že do dosažení původní hodnoty obsahu vody (v

ideálním případě rovnovážného stavu) je rychlost sušení téměř čtyřnásobná oproti sušení materiálu z porostu sklizeného před dosažením fáze zralosti.

Ve spojitosti s ostatními výsledky, včetně tlakových ztrát a průtoků vrstvou, lze získat podklady pro modelování procesu sušení v nehybné profukované vrstvě materiálu.

4.3.2.2. Sušení pilin

Stejným způsobem jako u stébelnatých materiálů byly provedeny experimentální pokusy pro dřevnaté suroviny, a to ve formě pilin (základní surovina pro výrobu tuhých biopaliv na bázi pelet a briket) a ve formě štěpky (nejčastěji využívané suroviny pro přímé spalování ve velkých zařízeních).

Jako vzorek pilin byla dodána odpadní dřevní hmota z pilařského provozu ve stavu drobných částic s občasou přítomností větších kusů. V době měření nebylo známo, že by vzorek vedle dřevní hmoty obsahoval jinou složku. Obsah popele a hodnota spalného tepla přítomnosti cizorodých látek tomu nenasvědčuje.

V zájmu přesnější klasifikace vzorku byla provedena síťová analýza za účelem získání přehledu o podílu jednotlivých velikostí (T01) a stanovení střední délky částice.

T01: výsledky síťové analýzy vzorků pilin

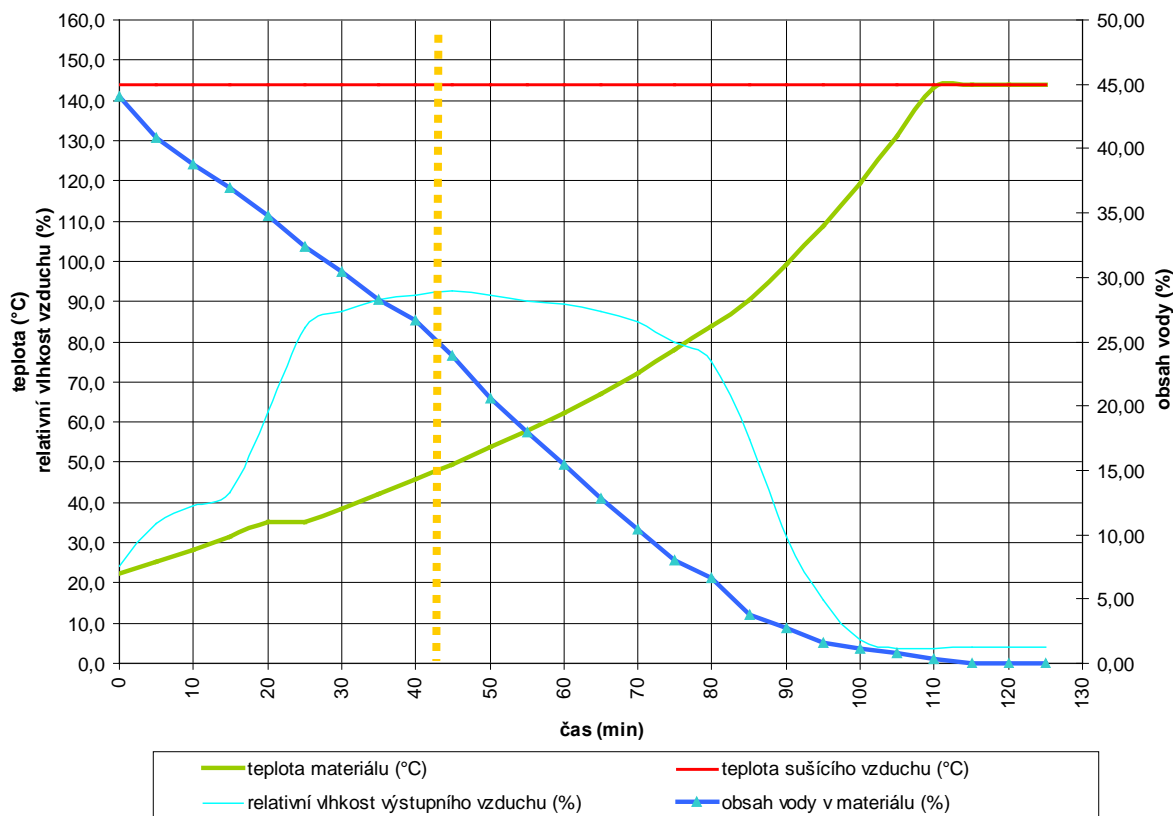
Průměr ok síta (mm)	Měření			průměr
	1	2	3	
11,2	7,12	5,7	5,07	5,96
5,0	8,09	7,84	8,56	8,16
3,5	7,25	6,72	6,72	6,90
2,8	15,98	21,71	23,01	20,23
1,4	40,34	37,46	35,83	37,88
1,0	7,50	5,92	5,51	6,31
propad	13,27	13,81	14,17	13,75

Střední délka částice měřeného materiálu byla 2,55 mm. Hmotnostní podíl částic větších než 11,2 mm byl cca 6 %.

Spalné teplo vzorku stanovené spalováním v adiabatických podmínkách pomocí kalorimetru bylo **18,62 MJ.kg⁻¹**. Výhřevnost vzorku byla (při stanovení výpočtem podle ČSN ISO 1928:1999) **6,113 MJ.kg⁻¹**.

Obsah popele vzorku byl **0,928 %** v sušině. Objemová hmotnost materiálu byla **228,13 kg.m⁻³** a průměrný obsah vody **51,2 %**.

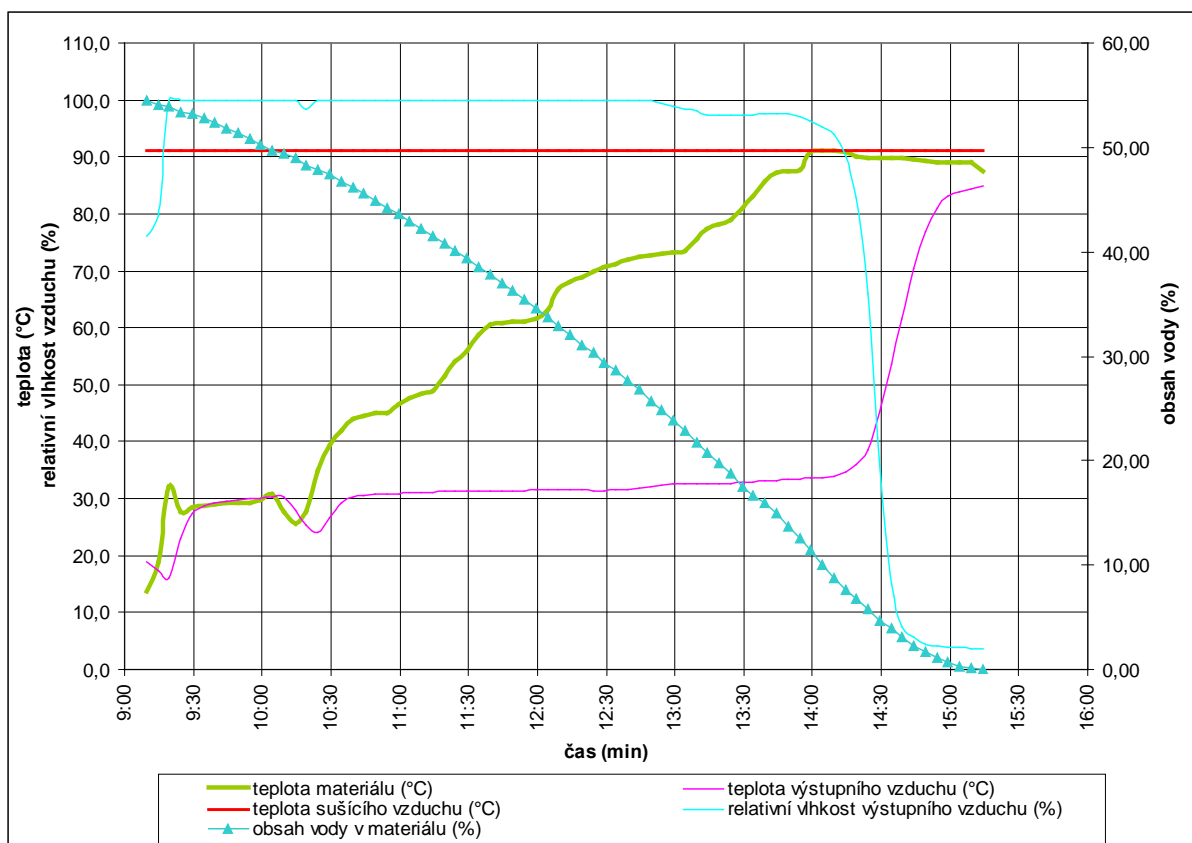
Klimatické podmínky v hale, kde měření probíhalo, byly ustálené a umožnily nastavení vzduchotechnického režimu ponechat beze změny po celou dobu měření. Materiál byl provzdušňován ve 4 vrstvách o průměrné šířce 50 mm. Záznamy průběhů teplot, relativní vlhkosti vzduchu na výstupu a obsahu vody v sušeném materiálu jsou zobrazeny na obr. 15 a 15.



Obr. 14: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy pilin vzduchem o teplotě 145 °C.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody se při teplotě sušícího vzduchu 145 °C byla **9,750 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **0,323 m³.s⁻¹**.

Pro stanovení vlastností při nižší teplotě sušení byla teplota sušícího vzduchu pro jiný experiment nastavena na **91 °C**, tedy hodnotu těsně pod bodem varu vody. Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí **18,9 až 85,0 °C**. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí **3,7 až 100,0 %**. Tlaková ztráta vrstvy se pohybovala v rozmezí **50 až 56 Pa**, průměrná hodnota rozdílu tlaku byla **51,2 Pa**.



Obr. 15: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy pilin vzduchem o teplotě 91 °C.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody se při teplotě sušícího vzduchu 91 °C pohybovala na úrovni **12,16 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **0,897 m³.s⁻¹**.

4.3.2.3. Sušení štěpky

Dalším zkoumaným typem surovin byla dřevní štěpka. Jako vzorek byla dodána lesní štěpka borová. U vzorku byla rovněž provedena analýza za účelem získání stanovení podílu jednotlivých velikostních frakcí (T02) a stanovení střední délky částice.

T02: výsledky sítové analýzy vzorku

Síta (mm)	Měření				Průměr
	1	2	3	4	
16,0	6,40	3,69	7,38	8,02	6,37
11,2	14,15	10,81	7,96	17,52	12,61
8,0	27,34	17,5	13,44	17,64	18,98
6,3	20,96	19,48	15,15	19,69	18,82
5,0	13,39	16,01	15,06	12,22	14,17
2,8	12,54	22,11	24,92	16,08	18,91
propad	5,77	10,91	16,72	9,74	10,79

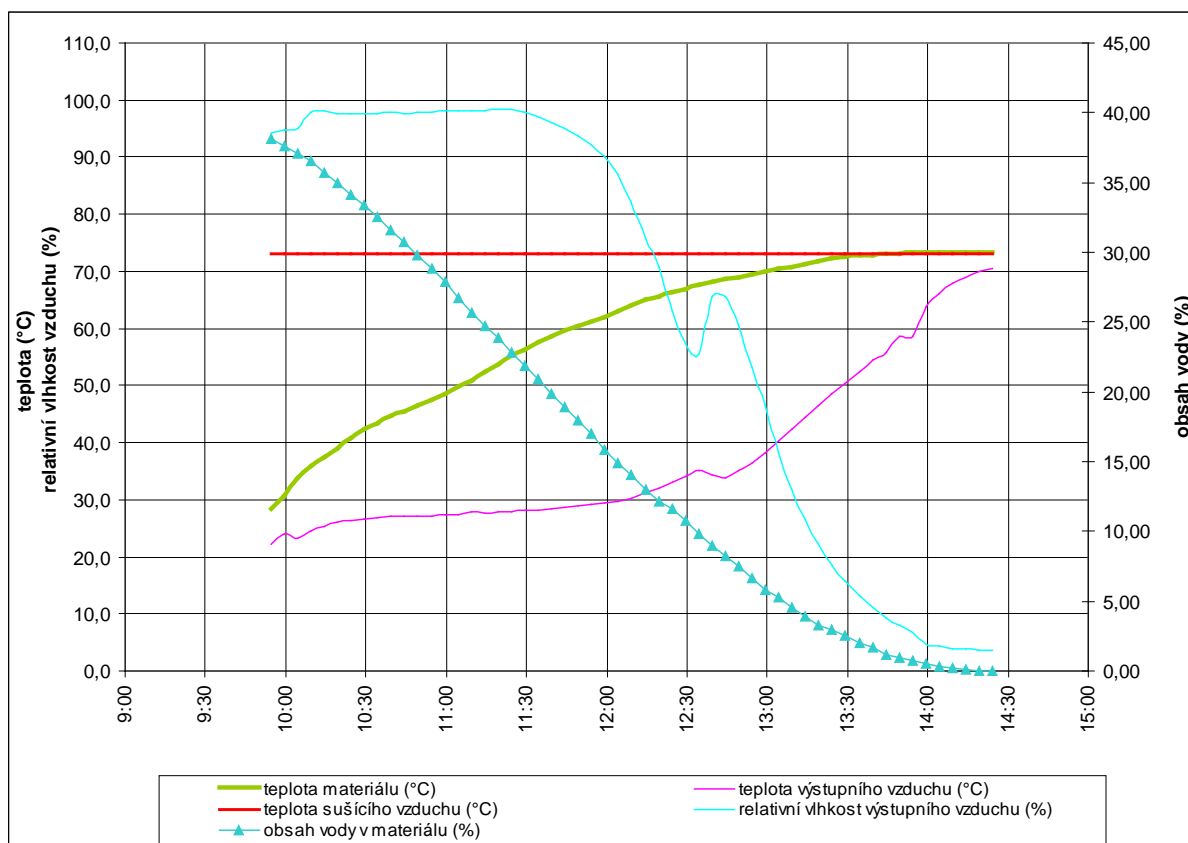
Střední délka částice měřeného materiálu byla 6,23 mm.

Spalné teplo vzorku stanovené spalováním v adiabatických podmínkách pomocí kalorimetru bylo **18,78 MJ.kg⁻¹**. Výhřevnost vzorku byla (při stanovení výpočtem podle ČSN ISO 1928:1999) **10,133 MJ.kg⁻¹**.

Obsah popele ve vzorku byl **0,74 %** v sušině. Objemová hmotnost materiálu byla **252,8 kg.m⁻³** a průměrný obsah vody **35,6 %**.

Materiál byl provzdušňován ve 4 vrstvách o průměrné šířce 50 mm. Hodnoty průtoku vzduchu sušenou vrstvou jsou v tabulce T02.

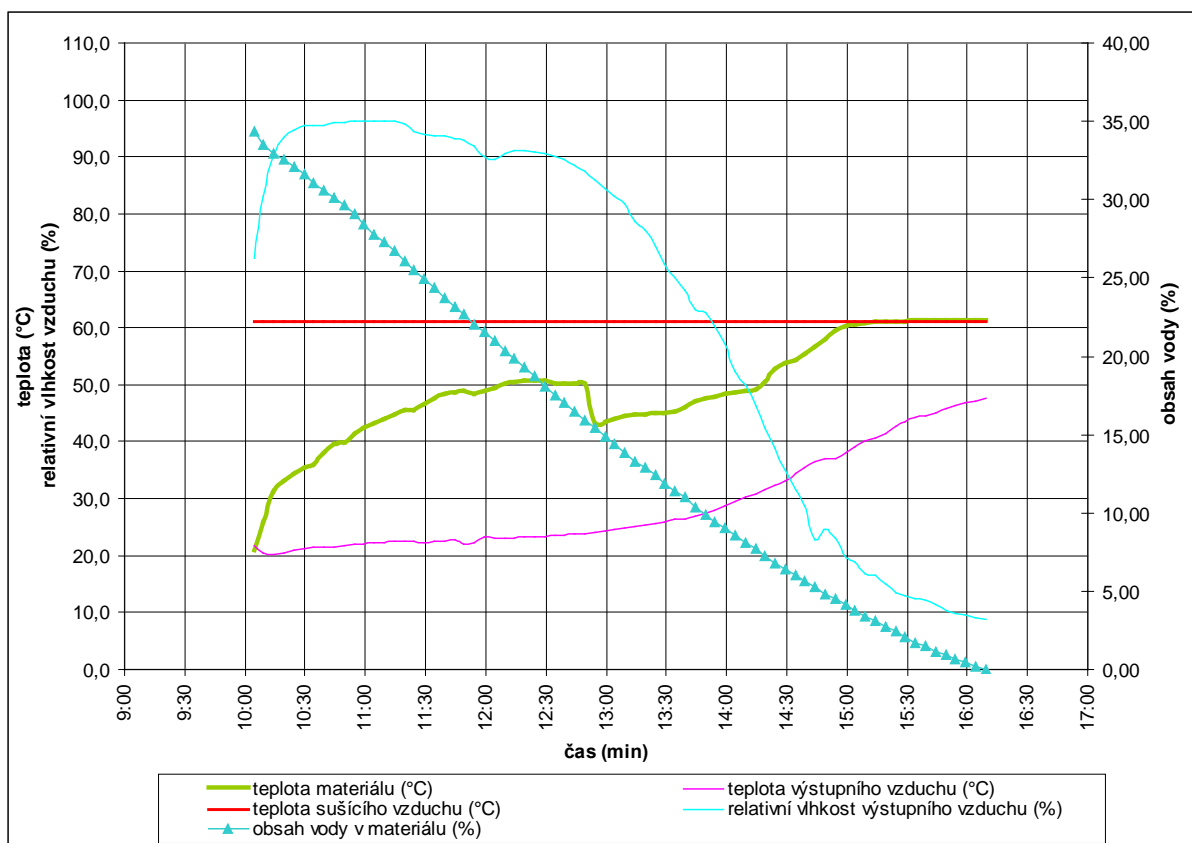
Jako simulace sušení teplem byl vzorek provzdušňován ustáleným proudem ohřátého vzduchu z otevřeného okruhu o stálé teplotě 73 a 61 °C. Záznamy průběhů teplot, relativní vlhkosti vzduchu na výstupu a obsahu vody v sušeném materiálu jsou zobrazeny na obr. 16 a 17.



Obr. 16: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy dřevní štěpky vzduchem o teplotě 73 °C.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody při provzdušňování dřevní štěpky vzduchem o teplotě 73 °C byla **8,903 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **2,169 m³.s⁻¹**.

Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí **22,1 až 70,4 °C**. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí **3,7 až 98,4 %**. Tlaková ztráta vrstvy se pohybovala v rozmezí **7 až 10 Pa**, průměrná hodnota rozdílu tlaku byla **7,55 Pa**.



Obr. 17: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy dřevní štěpky vzduchem o teplotě 61 °C.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody byla **8,25 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **1,814 m³.s⁻¹**.

Pro stanovení vlastností při nízkých teplotách sušení byla teplota sušícího vzduchu nastavena na **61 °C**. Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí **18,7 až 62,7 °C**. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí **8,8 až 96,3 %**. Tlaková ztráta vrstvy se pohybovala v rozmezí **8 až 10 Pa**, průměrná hodnota rozdílu tlaku byla **9,59 Pa**.

4.3.2.4. Sušení kompostu

Další surovinou potenciálně vhodnou pro energetické využití v případě snížení jeho přirozené vlhkosti je kompost. Jako vzorek byl dodán průmyslový kompost z biologicky rozložitelných odpadů. Analýza za účelem stanovení podílu jednotlivých velikostních frakcí (T03) a stanovení střední délky částice byla provedena standardně síťováním na třepacím stroji stejně jako ostatní zkoumané vzorky.

T03: výsledky síťové analýzy vzorků kompostu

síto Ø ok	1	2	3	průměr
5,5	11,22	8,62	10,10	9,98
4	5,55	4,54	3,97	4,69
3,5	7,88	6,37	6,43	6,89
2,8	7,77	6,85	6,82	7,15
2	10,67	10,51	10,96	10,71
1,4	10,80	10,87	10,53	10,74
1	8,80	9,26	8,99	9,01
0,5	13,47	15,45	15,32	14,75
0,25	12,67	14,93	14,74	14,11
propad	10,85	12,42	12,18	11,81

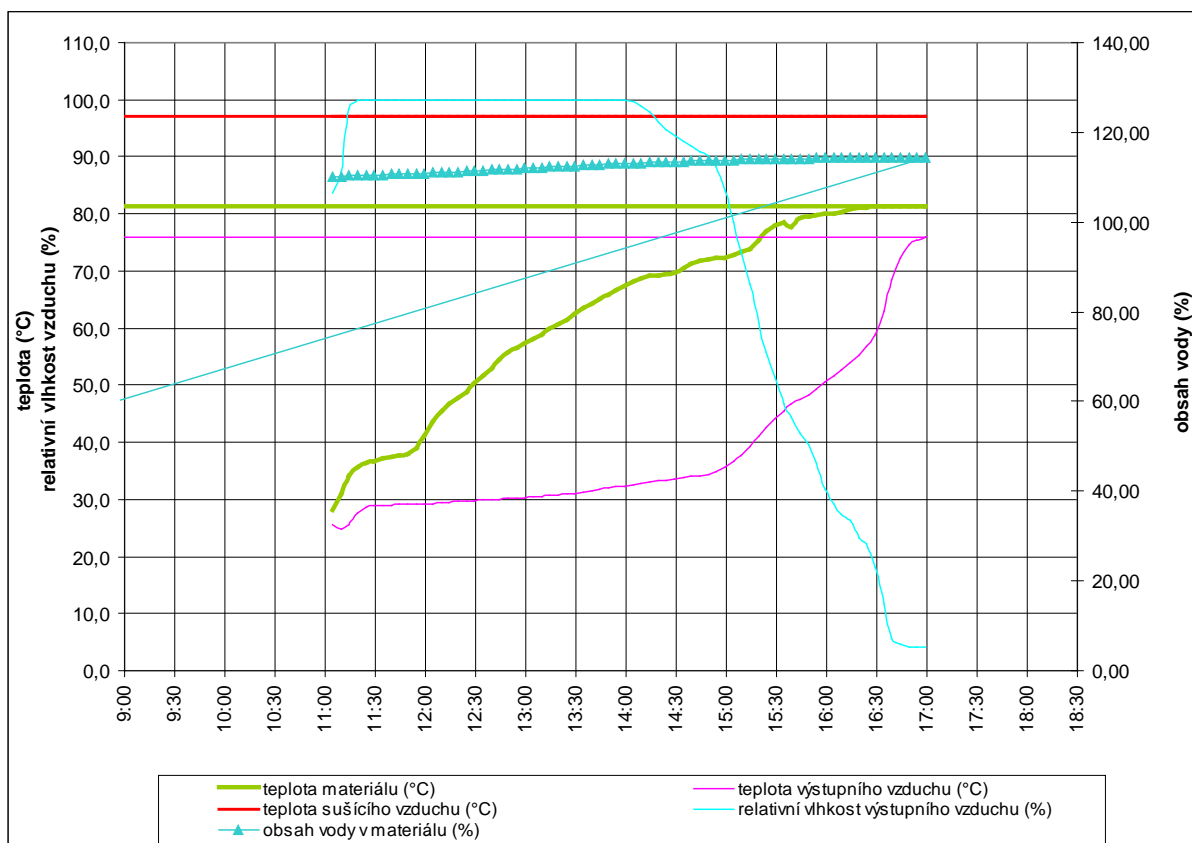
Střední délka částice měřeného materiálu byla 1,753 mm.

Spalné teplo vzorku stanovené spalováním v adiabatických podmínkách pomocí kalorimetru bylo **5,961 MJ.kg⁻¹**. Výhřevnost vzorku byla (při stanovení výpočtem podle ČSN ISO 1928:1999) **2,298 MJ.kg⁻¹**.

Obsah popele ve vzorku byl **76,39 %** v sušině. Objemová hmotnost materiálu byla **379,0 kg.m⁻³** a průměrný obsah vody **30,6 %**.

Jako simulace sušení teplem byl kompost provzdušňován ustáleným proudem ohřátého vzduchu z otevřeného okruhu o stálé teplotě 97 a 61 °C. Záznamy průběhů teplot, relativní vlhkosti vzduchu na výstupu a obsahu vody v sušeném materiálu jsou zobrazeny na obr. 18 a 19.

Při provzdušňování s nastavenou teplotou 97°C byl materiál provzdušňován ve 4 vrstvách o průměrné šířce 50 mm.



Obr. 18: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy kompostu vzduchem o teplotě 97 °C.

V grafu na obrázku 18 jsou uvedeny hodnoty teploty a vlhkosti výstupního vzduchu zaznamenávané v pětiminutových intervalech.

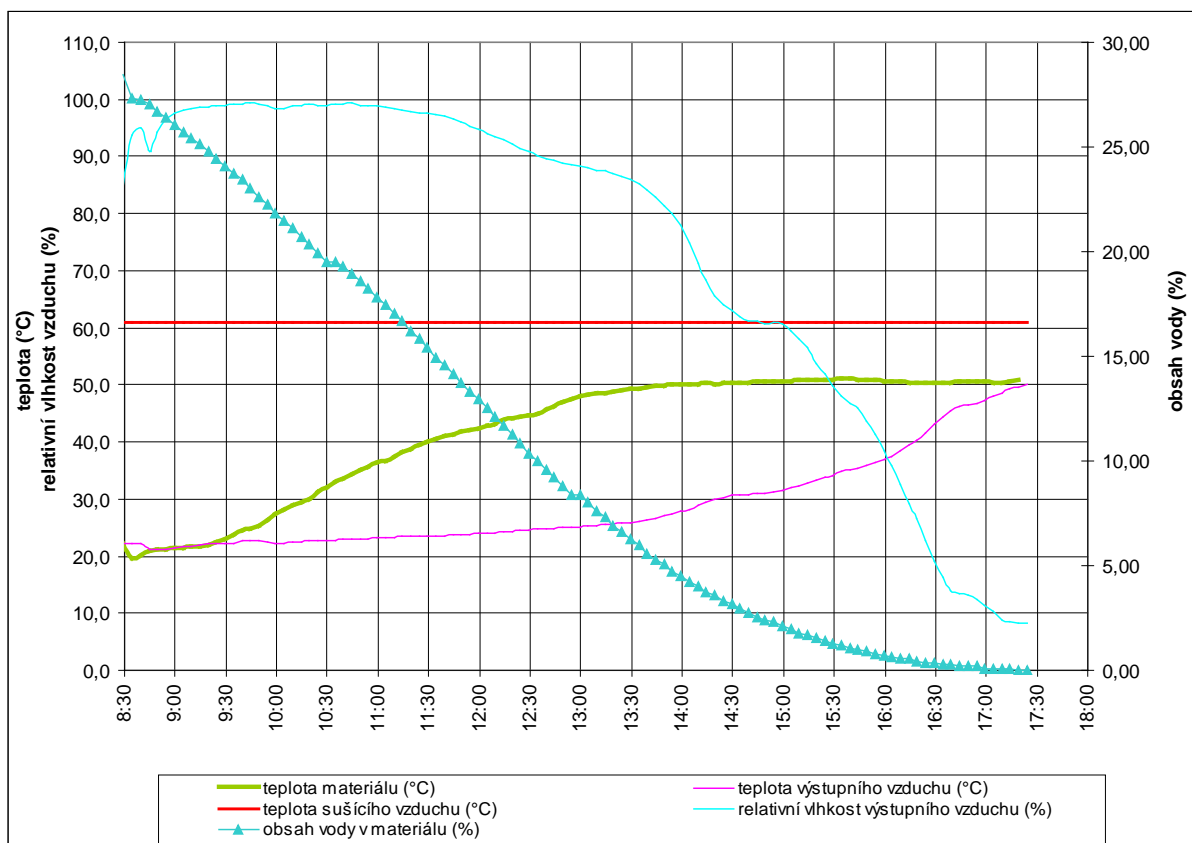
U teploty vzduchu je prvních 4,5 hodiny zaznamenán pomalý konstantní nárůst teplot. Po uplynutí této doby se rychlost ohřevu výrazně zvyšuje až do konce měření.

Relativní vlhkost vzduchu nejprve vzroste téměř k 100 % a následně postupně klesá až k hodnotám pod 10 %.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody byla $15,362 \text{ MJ.kg}^{-1}$ při průměrném průtoku vzduchu $0,922 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Pro stanovení vlastností při nízkých teplotách sušení byla teplota sušícího vzduchu nastavena na 97 °C. Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí 4,1 až 75,9 °C. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí 4,1 až 100,0 %. Tlaková ztráta vrstvy se pohybovala v rozmezí 52 až 95 Pa, průměrná hodnota rozdílu tlaku byla 65,5 Pa.

Při provzdušňování s nastavenou teplotou 61 °C byl materiál provzdušňován ve 4 vrstvách o průměrné šířce 25 mm.



Obr. 19: Průběh veličin při provzdušňování vrstvy kompostu vzduchem o teplotě 61 °C.

Měrná energie spotřebovaná na odpar vody při provzdušňování kompostu vzduchem o teplotě 61 °C byla **13,285 MJ.kg⁻¹** při průměrném průtoku vzduchu **1,027 m³.s⁻¹**.

Pro stanovení vlastností při nízkých teplotách sušení byla teplota sušícího vzduchu nastavena na **61 °C**. Teplota výstupního vzduchu se v průběhu měření pohybovala v rozmezí **21,1 až 50,0 °C**. Relativní vlhkost výstupního vzduchu se pohybovala v rozmezí **4,1 až 100,0 %**. Tlaková ztráta vrstvy se pohybovala v rozmezí **50 až 80 Pa**, průměrná hodnota rozdílu tlaku byla **58,8 Pa**.

V průběhu sušení je tlaková ztráta nejprve poměrně vysoká, ale postupně se materiál stává prostupnějším a tlaková ztráta klesá na konstantních 50 Pa.

Hmotnost materiálu v průběhu měření pravidelně klesá v závislosti na odparu vody.

5. Závěr

Požadovaná experimentální měření a jejich vyhodnocení včetně formulace získaných poznatků byla realizována v souladu s plánovaným postupem. Vzhledem k dosažení vytýčených cílů a časovému období, kdy byla převážná část experimentů realizována, byly jako stěžejní materiály použity rostlinné suroviny využitelné v energetice. Byly zvoleny suroviny, které jsou charakteristické vysokým potenciálem využitelnosti v oblasti bioenergetiky a to jako vstupní surovina pro výrobu biopaliv nebo pro přímé spalování.

Pro všechny zvolené typy surovin je zároveň charakteristické, že mají v surovém stavu poměrně vysoký obsah vody a snadno tak podléhají skáze vlivem biodegradabilních procesů způsobených plísněmi, kvasinkami, hnilobou, případně bakteriemi, což má při dlouhodobém skladování za následek nejen znehodnocení vlastní suroviny, ale i zvýšení zdravotních rizik vlivem uvolňování mykotoxinů a dalších škodlivin do okolí. Proto má jejich sušení značný význam nejen z hlediska zvýšení energetické hodnoty, ale zejména z hlediska logistiky a z hygienických důvodů.

Přehled základních parametrů získaných při experimentálním sušení vybraných vzorků provzdušňováním stacionární vrstvy je uveden v tabulce T04.

T04: Přehled základních parametrů při experimentálním sušení vybraných vzorků provzdušňováním stacionární vrstvy

	Teplota sušicího vzduchu (°C)	střední délka částice (mm)	měrná spotřebovaná energie (na 1 kg odpařené vody) (MJ.kg ⁻¹)	průtok vzduchu (m ³ .s ⁻¹)	tlaková ztráta (Pa)	obsah vody vstup (%)	obsah vody výstup (%)
piliny	145	2,55	9,75	0,323	51,2	54,2	0
piliny	91	2,55	12,16	0,897	51,2	54,2	0
štěpka	73	6,23	8,903	2,169	7,55	35,6	0
štěpka	61	6,23	8,25	1,814	9,59	35,6	0
kompost	97	1,75	15,362	0,922	65,5	30,6	0
kompost	61	1,75	13,285	1,027	58,8	30,6	0
chrastice	52	6,23	8,405	0,35	36	35,1	0

Z výsledků je zřejmé, že sledované parametry se vzájemně ovlivňují. Z provozního hlediska je důležité, že velikost a tvar částic má vliv na velikost tlakové ztráty a rychlost průtoku vzduchu. Při stejném nastavení sušárny se díky nižšímu odporu vrstvy materiálu zvyšuje průtok vzduchu a umožňuje tak sušení při nižší měrné spotřebě energie. Experimenty dále potvrzují teoretický předpoklad, že efektivnější je způsob sušení při teplotách nad 100 °C (porovnání piliny 145 °C a piliny 91 °C).

Při sušení pod hranicí 100 °C se jeví jako efektivnější sušení při nižších teplotách (porovnání štěpka 73 °C /61 °C a kompost 97 °C /61 °C). Fakt ovšem platí pouze ze předpokladu, že je vzduch nutné ohřívat na vyšší teplotu. V případě, že je k dispozici „zdarma“ zdroj odpadního tepla o vyšší teplotě, je výhodnější jeho použití z důvodů nižší

potřeby množství sušícího vzduchu a tím pádem nižší spotřeby energie vynaložené na provzdušňování.

Z praktických důvodů pro průběh a vyhodnocení experimentů byly vzorky vysušeny až do konstantní hmotnosti, tedy téměř na 0 % obsahu vody. Tabulka T05 udává spotřebu energie vztaženou na hmotnost vzorku a porovnání výhřevnosti zkoumaných vzorků před sušením a po sušení.

T05: Měrná spotřeba energie a zvýšení výhřevnosti při vysušení vzorků na 0 % obsahu vody

	Teplota sušícího vzduchu	měrná spotřebovaná energie (na 1 kg vzorku)	obsah vody vstup	výhřevnost před	obsah vody výstup	výhřevnost po	Zvýšení výhřevnosti
	(°C)	(MJ.kg ⁻¹)	(%)	(MJ.kg ⁻¹)	(%)	(MJ.kg ⁻¹)	(MJ.kg ⁻¹)
piliny	145	5,28	54,2	6,113	0	17,528	11,415
piliny	91	6,59	54,2	6,113	0	17,528	11,415
štěpka	73	3,17	35,6	10,133	0	17,688	7,555
štěpka	61	2,94	35,6	10,133	0	17,688	7,555
kompost	97	4,70	30,6	2,298	0	4,869	2,571
kompost	61	4,07	30,6	2,298	0	4,869	2,571
chrastice	52	2,95	35,1	9,635	0	17,626	7,991

Jak bylo uvedeno výše, vzorky byly v průběhu experimentu vysušeny téměř na 0 % (usušené vzorky obsahovaly pouze podíl vody, který odpovídá rovnovážnému stavu se sušicím médiem).

V praxi ovšem není prakticky ani ekonomicky efektivní sušit suroviny na takto nízký obsah vody. Speciálně u surovin určených pro energetické využití postačí, je-li jejich vlhkost snížena na bezpečnou hodnotu zabraňující vzniku zmíněných biodegradabilních procesů. Jako taková hranice je vnímána hodnota cca 15 %. Přepočtené parametry při sušení vzorků na 15 procentní obsah vody je uveden v tabulce T06.

T06: Měrná spotřeba energie a zvýšení výhřevnosti při vysušení vzorků na 15 % obsahu vody

	Teplota sušicího vzduchu	měrná spotřebovaná energie (na 1 kg vzorku)	obsah vody vstup	výhřevnost před	obsah vody výstup	výhřevnost po	Zvýšení výhřevnosti
	(°C)	(MJ.kg ⁻¹)	(%)	(MJ.kg ⁻¹)	(%)	(MJ.kg ⁻¹)	(MJ.kg ⁻¹)
piliny	145	3,82	54,2	6,113	0	14,369	8,256
piliny	91	4,77	54,2	6,113	0	14,369	8,256
štěpka	73	1,83	35,6	10,133	0	14,505	4,372
štěpka	61	1,70	35,6	10,133	0	14,505	4,372
kompost	97	2,40	30,6	2,298	0	3,609	1,311
kompost	61	2,07	30,6	2,298	0	3,609	1,311
chrástice	52	1,69	35,1	9,635	0	13,524	3,889

Z porovnání obou tabulek je zřejmé, že měrná spotřeba energie při sušení surovin na 15% obsahu vody je energeticky méně náročná a tedy efektivnější. Při sušení měřeného materiálu na finální obsah vody 15 % je doba sušení zhruba poloviční než při úplném vysušení materiálu na obsah vody 0 %. Tomu odpovídá rovněž množství energie spotřebované na ohřev a pohon sušicího média.

Z realizovaných experimentů vyplývá, že využití odpadního tepla pro sušení rostlinných surovin je možné. Jako obtížně schůdná se ale jeví alternativa „univerzálního řešení“. Jako reálné se naopak jeví řešení individuálního řešení jednotlivých projektů, které bude zohledňovat reálné možnosti zdroje tepla a zejména fyzikální vlastnosti převažujícího druhu sušené suroviny.

Výsledky a hodnoty uvedené ve zprávě je nutné chápat jako konkrétní výsledky experimentů prováděných na konkrétním zařízení. To znamená, že jejich vzájemné vztahy budou v praxi platit, ale pro jiná zařízení se mohou lišit v absolutních hodnotách sledovaných veličin.

6. Seznam použité literatury

- . HINGE, J. – NIELSEN, K.V.: Logistic for harvest, transportation and storage of willow (salix). Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, Denmark 24-27 June 1996, s. 121.
- . MATTSSON, J.E – KOFMAN, P.D.: Influence of particle size and moisture content on tendency to bridge in biofuels made from willow shoots. Biomass and Bioenergy, vol. 24, 2003, p. 429–435.
- . OSWALD, J.: Niektoré fyzikálne vlastnosti sypkých drevných materiálov (KDP). VŠLD vo Zvolene, Zvolen, 1970.
- . SOUČEK, J.: Biopaliva z komunálních odpadů na bázi biomasy, *Mechanizace zemědělství*, 05/2005, str. 56 – 58, ISSN: 0373-6776
- . Souhrada, J., Jevič, P., Chmelík, K.: Využití nízkoteplotního sušení při výrobě krmiv, ÚZPI, 1984
- . SRIDHAR, G. – SRIDHAR, H.V. – DASAPPA, S.: Technology for gasifying pulverised bio-fuels including agricultural residues. Energy for Sustainable Development, vol. 3, 1996, p. 9-18.