



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

TRANSPORTNÍ A TERMOFYZIKÁLNÍ DATA PRO VÝ- POČTY TERMICKÉ SANITACE OSIV ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN

TRANSPORT AND THERMOPHYSICAL DATA FOR THERMIC SANITATION CALCULATION OF AG-
RICULTURAL SEEDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dan Vávra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| Ústav: | Ústav procesního inženýrství |
| Student: | Dan Vávra |
| Studijní program: | Základy strojního inženýrství |
| Studijní obor: | Základy strojního inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Tomáš Juřena, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/23 |

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

Transportní a termofyzikální data pro výpočty termické sanitace osiv zemědělských plodin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V duchu ekologického zemědělství se jeví ošetření osiv fyzikálními procesy jako perspektivní alternativa k současně hojně používanému chemickému moření. Jednou z možností je využití termických procesů. Pro návrh zařízení ošetřující osiva termickým procesem je nutná znalost fyzikálních vlastností zpracovávaných osiv, a to jednak termofyzikálních vlastností (např. měrná tepelná kapacita), tak i vlastností, které charakterizují osiva jako sypkou hmotu (např. mezerovitost, sypný úhel a další). Práce bude kombinovat rešeršní a experimentální činnost získání souboru potřebných dat vlastností vybraných osiv.

Cíle bakalářské práce:

- (1) Význam sanitace osiv a stručný přehled používaných metod včetně příkladů jejich aplikace.
- (2) Popis termické sanitace a faktorů, které proces ovlivňují.
- (3) Rešerše dostupných dat pro veličiny, která charakterizují vybraná osiva z hlediska:
 - vlastností sypkých hmot,
 - termo–fyzikálních vlastností.
- (4) Provedení a vyhodnocení vlastních měření, která doplní/upřesní data u výše uvedených skupin vlastností (dle možností laboratoře).
- (5) Shrnutí a vyhodnocení poznatků z rešeršní a experimentální části.

Seznam doporučené literatury:

MEDEK, Jaroslav. Mechanické pochody, skripta Vysoké učení technické, Brno, 1998, ISBN 80- 214-1264-X.

MEDEK, Jaroslav. Experimentální metody, skripta Vysoké učení technické, Brno, 1993, ISBN 80-214-0552-X.

MEDEK, Jaroslav, Miloš MOLÁČEK a Josef UHEREK. Experimentální práce, skripta VUT Brno, 1997, ISBN 80-214-0969-X.

MARTINEK, Václav a Pavel FILIP. Mlynářská technologie svazek 2, Skladování a příprava surovin, Mlynářské noviny, 2012. ISBN 978-80-23-9947-59.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na vlastnosti, které jsou důležité pro termickou sanitaci. V teoretické části jsou shrnuty běžně používané metody ošetření osiv. Dále jsou vypsány a popsány transportní a termo-fyzikální vlastnosti osiv. Do dnešní doby jsou zjištěny vlastnosti pro semínka pšenice, pro semínka hrachu je publikací méně. Dostupné vlastnosti jsou rešeršně zjištěny pro semínka pšenice a hrachu. Dále jsou ověřeny postupy experimentů pro získání vlastností pšenice a poté jsou dané postupy aplikovány na hrách. V experimentech jsou získány hodnoty pro mezerovitost, sypnou hmotnost, hustotu, statický sypný úhel a měrnou tepelnou kapacitu při konkrétní vlhkosti. Výsledné hodnoty jsou doplněny o celkové nejistoty. Získané vlastnosti jsou diskutovány.

Klíčová slova

termická sanitace, osivo, pšenice, hrách, mezerovitost, sypná hmotnost, hustota, statický sypný úhel, měrná tepelná kapacita

Abstract

The bachelor's thesis focuses on properties that are important for thermal sanitation. Commonly used seed treatment methods are summarized in the theoretical part. Furthermore, seeds' transport and thermo-physical properties are written out and described. To the present day, the properties of wheat seeds have been determined, while there are fewer publications for pea seeds. The available properties were determined by research for wheat and pea seeds. Furthermore, the experimental procedures for obtaining wheat properties were verified and then the procedures were applied to pea seeds. In the experiments, values were obtained for porosity, bulk density, true density, static angle of repose and specific heat capacity for certain humidity. The results are written out with total measurement uncertainties. The values of properties were discussed.

Keywords

thermal sanitation, wheat, pea, porosity, bulk density, true density, static angle of repose, specific heat capacity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁVRA, Dan. *Transportní a termofyzikální data pro výpočty termické sanitace osiv zemědělských plodin* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149531>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Juřena.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáš Juřena, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

Vávra Dan

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Tomášovi Juřenovi, Ph.D. za jeho pomoc, ochotu a trpělivost při psaní bakalářské práce.

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod | 11 |
| 1 Metody ošetření osiv | 12 |
| 1.1 Moření osiv | 12 |
| 1.2 Fyzikální ošetření osiva (termická sanitace)..... | 12 |
| 1.2.1 Horká voda | 12 |
| 1.2.2 Suché tepelné ošetření (Dry Heat Treatment) | 13 |
| 1.2.3 Provzdušněné tepelné ošetření (Aerated Heat Treatment) | 13 |
| 1.3 Obalování osiv | 13 |
| 1.3.1 Potahování vrstvou (Film coating) | 13 |
| 1.3.2 Inkrustace..... | 13 |
| 1.3.3 Peletování | 13 |
| 1.4 Priming..... | 13 |
| 2 Vlastnosti osiv | 15 |
| 2.1 Sypný úhel | 15 |
| 2.2 Mezerovitost | 15 |
| 2.3 Hustota | 16 |
| 2.4 Objemová hmotnost..... | 16 |
| 2.5 Sypná hmotnost..... | 16 |
| 2.6 Měrná tepelná kapacita | 17 |
| 2.7 Tepelná vodivost..... | 17 |
| 2.8 Tepelná difuzivita | 17 |
| 2.9 Emisivita | 17 |
| 3 Rešerše dostupných dat | 19 |
| 3.1 Semena pšenice | 19 |
| 3.2 Semena hrachu | 21 |
| 4 Měření vlastností osiv..... | 23 |
| 4.1 Specifikace měřidel..... | 23 |
| 4.2 Měření sypné hmotnosti..... | 23 |
| 4.3 Měření hustoty | 24 |
| 4.4 Měření mezerovitost | 25 |
| 4.5 Měření sypného úhlu..... | 26 |
| 4.6 Měření měrné tepelné kapacity | 28 |
| 5 Vyhodnocení experimentů..... | 31 |
| Závěr | 35 |
| Seznam použitých zdrojů..... | 36 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 39 |
| Seznam příloh | 40 |

Úvod

Ošetření osiv je klíčovým krokem při přípravě kvalitního osivového materiálu. Existuje několik přístupů k ošetření osiv, přičemž se často diskutuje o výhodách fyzikálních procesů oproti chemickým.

V průběhu let bylo v ošetřování osiv používáno mnoho chemických látek, jako jsou pesticidy, které mají za cíl potlačit škůdce a choroby. Nicméně se ukazuje, že tyto chemikálie představují určité nevýhody, jako jsou negativní dopady na životní prostředí a lidské zdraví.

Důvodem, proč je lepší preferovat fyzikální procesy, je jejich šetrnost k životnímu prostředí. Zatímco chemické látky mohou zanechat zbytky v půdě a vodních zdrojích, fyzikální procesy, nepředstavují riziko pro životní prostředí. Tím se snižuje negativní vliv na biodiverzitu a ekosystémy. Pesticidy používané při chemickém ošetření osiv mají toxické vlastnosti, které závisí na typu pesticidu. V dnešní době je snahou snížit používání toxických látek.

Při fyzikálním ošetření osiv se nepoužívají chemikálie, které by mohly zůstat na povrchu plodin po jejich výsadbě. To znamená, že potraviny vyrobené z takových osiv jsou bezpečnější pro spotřebitele.

Fyzikální ošetření osiv neporušuje přirozenou rovnováhu v ekosystému, protože nezabíjí nebo nenarušuje přírodní predátory škůdců.

Při opakovaném používání chemických látek na ošetření osiv si mohou škůdci a choroby vyvinout rezistenci vůči těmto chemikáliím. Fyzikální metody, jako je mechanické ošetření osiv, nemají stejný potenciál pro vznik rezistence u škůdců a nemusí vyžadovat použití silnějších nebo toxických látek.

Navíc, fyzikální procesy mají tendenci zachovávat genetickou stabilitu osiv, oproti tomu chemické látky mohou ovlivnit genetickou informaci obsaženou v osivech a vést k nežádoucím mutacím.

Chemické ošetření může představovat velké náklady na nákup pesticidů a vybavení, a také vyžaduje regulaci a dodržování bezpečnostních opatření. Evropská unie chce omezit množství chemických látek pomocí legislativy [1].

Vzhledem k těmto faktorům je stále více zemědělců a výzkumníků nakloněno používání fyzikálních procesů při ošetřování osiv. Tyto procesy nabízejí šetrnější alternativu k chemickým látkám a přispívají k udržitelnému zemědělství a ochraně životního prostředí.

Cílem práce je vypsát a popsat typy ošetření osiv, shrnout dostupná data o termo–fyzikálních a transportních vlastnostech semen pšenice a hrachu, které jsou zapotřebí pro návrh zařízení pro termickou sanitaci. Poté je zapotřebí experimentálně ověřit a doplnit získaná data pro pšenici a hrách.

1 Metody ošetření osiv

Hlavní roli v zemědělství rozvojových zemí, jako je Indie, kde populace a HDP (hrubý domácí produkt) značně závisí na zemědělství, hraje osivo [2]. Chemické ošetření aplikované přímo na půdu má své omezení, jako jsou vysoké náklady, vliv na cílené organismy, toxicita vůči rostlinám a zvířatům, znečištění životního prostředí [3]. Zvyšuje se zájem o vývoj postupů nebo nástrojů, které samy o sobě nebo ve spojení s dalšími postupy umožní redukcí potenciální infekce a zároveň zajistí udržitelnost produkce, efektivitu nákladů a zdravý ekosystém [4]. Ošetření osiva je vystavení osiv určitým fyzikálním, chemickým nebo biologickým látkám, které jsou použity nejen k tomu, aby byla semena očištěna od škůdců a chorob, ale také k tomu, aby poskytla možnost kontroly škůdců a chorob během klíčení [5]. Hlavní roli v udržitelné produkci plodin hraje právě ošetření osiva, které pomohlo zvýšit výnosy mnoha různých plodin tím, že poskytlo ochranu proti škůdcům a chorobám. [6]. Při manipulaci s osivem by nemělo být nijak mechanicky poškozeno [7].

Složitost ošetření semen se pohybuje od základního moření po obalování a peletování. Metody ošetření jsou aplikované přímo na samotná semena před setím za účelem kontroly přenášených chorob rostlin [4]. Tato kapitola uvádí stručný přehled metod používaných pro ošetření osiv.

1.1 Moření osiv

V současnosti je chemické ošetření osiva velmi běžné díky schopnosti potlačovat choroby rostlin a škůdce [8]. Chemické ošetření semen je aplikování fungicidů nebo insekticidů přímo na semeno [4]. Inokulace neboli naočkování semen biologickými činidly v kombinaci s primingem (popsáno později) podporuje rychlé a rovnoměrné klíčení semen a růst rostlin [9]. Publikace [7] uvádí tyto metody moření: suché, kombinované moření a inkrustace.

1.2 Fyzikální ošetření osiva (termická sanitace)

S ohledem na vedlejší účinky chemikálií na ekosystém a organismus byly vyvinuty alternativní metody pro ošetřování semen, tedy ošetření semen fyzikálně. Tepelné ošetření semen se prakticky používá různými způsoby, jednoduchým způsobem tepelného ošetření je solarizace, kdy se semena zahřívají ozářením ze slunce, která se někdy uplatňuje v teplých zemích [4].

1.2.1 Horká voda

Úprava horkou vodou je starší metoda, kde se pomocí dostatečně vysokých teplot usmrcejí organismy, ale ne horkých natolik, aby zabila semena. Stále se používá jako velmi účinná alternativa [10]. Tato metoda zůstává standardní metodou pro eliminaci patogenů, také je šetrnější k životnímu prostředí a účinnější ve srovnání s chemickým ošetřením. Ovšem může způsobit ztrátu klíčivosti semen [4]. Tato metoda je doporučena např. pro lilek, papriku, rajče, okurku a mrkev a nemusí být vhodná pro semena hrachu, fazolí, salátu, řepy a některých dalších plodin [10]. Publikace [7] uvádí příklady použití této metody na kukuřici, pšenici, mrkve a zelí.

1.2.2 Suché tepelné ošetření (Dry Heat Treatment)

Suchý horký vzduch byl nejčastěji používán proti hmyzu v zásobách obilí [11], ale ve většině případů neprokázal dobrý potenciál proti houbovým infekcím v semenech [12]. Suché tepelné ošetření je prostředek pro inaktivaci virů přenášených semeny a dalších patogenů. Podle [13] ošetření suchým teplem po dobu 4-7 dnů při 60 °C nebo až 4 dny při 70 °C snižuje možnou antraknózovou infekci v semenech lupiny.

1.2.3 Provzdušněné tepelné ošetření (Aerated Heat Treatment)

Použitá metoda tepelného ošetření se v zásadě skládá ze dvou fází. Fáze ohřevu, kdy se semena zahřívají po určitou dobu vzduchem o určité teplotě a relativní vlhkosti, následuje fáze ochlazování, která přerušuje proces ještě před tím, než jsou semena narušená. Zařízení byla konstruována tak, aby umožňovala přesné řízení důležitých parametrů (teplota, vlhkost vzduchu, doba ošetření, proudění vzduchu, doba zahřívání a chlazení). [4]

1.3 Obalování osiv

Obalování semen je proces nanášení exogenních materiálů na povrch přirozeného obalu semen [14]. Používá se ke zlepšení kvality setí, rozdělení semen v řádku [7] a k úpravě fyzikálních vlastností semen [14].

1.3.1 Potahování vrstvou (Film coating)

Potahování tenkou vrstvou je metoda, která zahrnuje aplikaci tenké vrstvy (obvykle do 10 % hmotnosti semene) prospěšného činidla na povrch obalu semene [14]. Pro aplikaci rozpuštěného materiálu na povrch semen lze použít ošetřovače s fluidním ložem nebo farmaceutické obalovací bubny [15].

1.3.2 Inkrustace

Inkrustace zahrnuje aplikaci obalování semen tak, že se hmotnost semene zvýší až o 8–500 % s menším nebo žádným dopadem na původní tvar semene [15]. Samotný materiál pro inkrustaci semen se skládá z polymeru, aditiv a barviv [7]. Postup inkrustace je pak popsán v publikaci [7].

1.3.3 Peletování

Výsledkem peletování je změna fyzického tvaru osiva. Jelikož mnoho semen plodin je malých a nepravidelného tvaru, není možné přesné dávkování mechanickými sázecími zařízeními [4]. Postup peletování je detailně popsán v publikaci [7]. Peletování semen bylo úspěšně použito pro zlepšení klíčení, vitality a skladování semen rajčat [15].

1.4 Priming

Priming neboli aktivace osiva popisuje širokou skupinu hydratačních technik používaných ke zvýšení výkonnosti osiva na poli nebo v systémech produkce s kontrolovaným prostředím. Termín priming semen se také používá k popisu biologických procesů a změn, ke kterým dochází během ošetření hydratací (a sušením) semen [16]. Priming je v zájmu výzkumníků

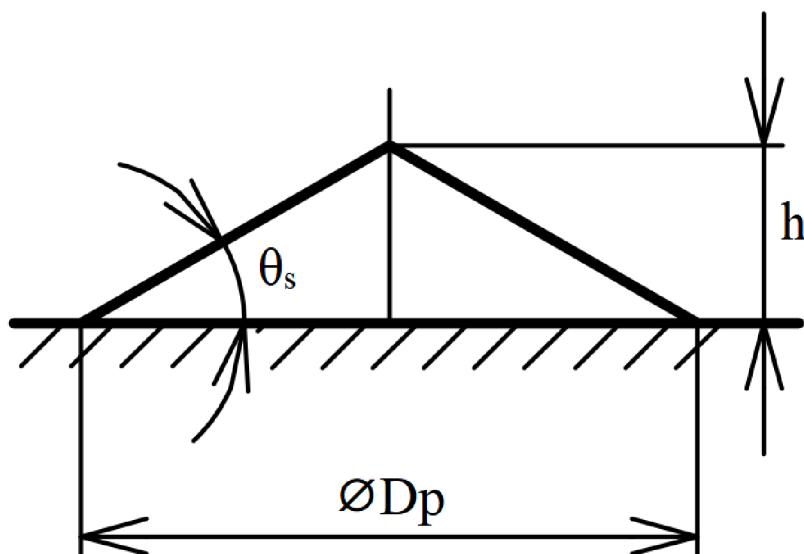
v oblasti semenářství používán jako nástroj pro pochopení procesu klíčení. Semena se aktivují na obsah vody po dobu kratší, než je doba potřebná pro úplné vyklíčení, a pak se obvykle suší. Aktivovaná semena jsou v podstatě držena ve fázi klíčení omezením vodního potenciálu, nebo kvůli nedostatku času na klíčení. Fáze příjmu vody a klíčení semen je dosaženo po následném výsevu a rehydrataci [4]. Bylo navrženo několik metod pro regulaci dostupnosti vody (jako kapaliny nebo v plynné fázi) pro semena dále popsány v publikaci [4].

2 Vlastnosti osiv

Pro provedení termické sanitace je zapotřebí znát určité vlastnosti osiva, nejdůležitější jsou vlastnosti termo–fyzikální a transportní vlastnosti sypaných hmot. V následujících podkapitolách jsou popsány nejdůležitější vlastnosti pro termickou sanitaci i s příslušnými rovnicemi.

2.1 Sypný úhel

Sypný úhel je definován jako úhel odklonu povrchu volně sypaného materiálu od vodorovné roviny – podložky. Pokud je materiál nasypáván z jednoho místa, vytvoří se typický symetrický sypný kužel viz Obr. 1 [17].



Obr. 1 Sypný kužel

$$\operatorname{tg}\theta_s = \frac{2h}{D_p} \quad (1)$$

kde: θ_s (°) je sypný úhel
 h (m) je výška kužele
 D_p (m) je průměr kužele

2.2 Mezerovitost

Mezerovitost ε (-) je poměr objemu, který vyplňují mezery mezi jednotlivými částicemi V_ε (vnější, povrchové póry) k celkovému objemu porézní přepážky V_{por} [17].

$$\varepsilon = \frac{V_\varepsilon}{V_{\text{por}}} = \frac{V_\varepsilon}{V_p + V_\varepsilon} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (2)$$

kde: ε (-) je mezerovitost
 V_ε (m³) je objem mezer mezi jednotlivými částicemi
 V_p (m³) je celkový objem částic
 V_{por} (m³) je objem porézní přepážky

2.3 Hustota

Hustota je poměr hmotnosti homogenní látky a objemu. Pro dané podmínky (teplota, tlak) je hustota látkovou konstantou.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

kde: ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota látky
 m (kg) je hmotnost látky
 V (m^3) je objem látky

2.4 Objemová hmotnost

Pojem hustota je vždy vázán k fyzikálně homogenní látce. Proto tento pojem nelze použít pro obdobnou definici pro partikulární látku, která je vždy tvořena více fázemi. Místo hustoty je zaveden pojem objemová hmotnost [17]. Při velmi nízké pórovitosti se hodnota objemové hmotnosti blíží hustotě.

$$\rho' = \frac{m'}{V_{\text{nm}}} \quad (4)$$

kde: m' (kg) je hmotnost objemové jednotky nehomogenního materiálu včetně otevřených i uzavřených pórů a dutin.

ρ' ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je objemová hmotnost

V_{nm} (m^3) je objem nehomogenního materiálu včetně otevřených i uzavřených pórů a dutin

$$\rho' = \frac{m}{V_{\text{nm}}} - \frac{\bar{\varepsilon}m}{V_{\text{nm}}} = \rho_p - \bar{\varepsilon}\rho_p = \rho_p(1 - \bar{\varepsilon}) \quad (5)$$

kde: m (kg) je hmotnost vrstvy partikulární látky pro $\varepsilon = 0$ (pevná látka)

ρ_p ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota částic pevné látky

$\bar{\varepsilon}$ (-) je průměrná mezerovitost nehomogenního materiálu (tzv. pórovitost)

Z rovnice lze stanovit pórovitost

$$\bar{\varepsilon} = \frac{(\rho_p - \rho')}{\rho_p} \quad (6)$$

2.5 Sypná hmotnost

Sypná hmotnost je střední objemová hmotnost partikulární látky volně sypané bez setřesení nebo definovaně setřesené. Setřesením lze snížit objem a tím zvýšit hodnotu sypné hmotnosti [17].

$$\rho'_s = \frac{m}{V_{\text{por}}} \quad (7)$$

kde: ρ'_s ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je sypná hmotnost

2.6 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg homogenní látky o 1 °C nebo 1 K

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (8)$$

kde: c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita
 dQ (J) je teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti m o teplotu dT
 dT (K) je infinitezimální změna teploty

U nehomogenního materiálu se měrná tepelná kapacita vypočítá váženým průměrem tepelných kapacit jednotlivých složek. Především u látek s proměnlivým obsahem vody. Pro příklad lze uvést semínka pšenice, které mají různou vlhkost, měrná tepelná kapacita je v závislosti na vlhkosti a je vyjádřena pomocí rovnice

$$c_p = \frac{c_v \cdot M + c_p \cdot (100 - M)}{100} \quad (9)$$

kde: c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita pšenice
 c_v ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita vody
 M (%) je vlhkost pšenice

2.7 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo. Součinitel tepelné vodivosti vyjadřuje množství tepla, které projde za jednotku času (tzv. tepelný tok) jednotkovou plochou izotermického povrchu, přičemž v tělese je jednotkový teplotní gradient. Pro stacionární vedení tepla se využívá Fourierův zákon, který má tvar

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (10)$$

kde: λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je tepelná vodivost
 \dot{q} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) je tepelný tok
 T (K) je termodynamická teplota

2.8 Tepelná difuzivita

Tepelná difuzivita vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (11)$$

kde: α ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je tepelná difuzivita
 c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita za stálého tlaku

2.9 Emisivita

Je poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování černého tělesa o stejné teplotě.

$$\varepsilon_T = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}} \quad (12)$$

kde: ε_T (-) je emisivita

M_λ (W/m²) je intenzita vyzařování reálného tělesa

$M_{0\lambda}$ (W/m²) je intenzita vyzařování černého tělesa

3 Rešerše dostupných dat

Z předchozího výpisu vlastností osiv se dále zaměříme hlavně na mezerovitost, sypnou hmotnost, hustotu, statický sypný úhel a měrnou tepelnou kapacitu.

3.1 Semena pšenice

Publikací, které se zabývají experimenty se semínky pšenice je mnoho. Pro sypnou hmotnost, hustotu, mezerovitost a statický sypný úhel pšenice lze dohledat poměrně velké množství dat, ovšem pro termo–fyzikální vlastnosti jako je měrná tepelná kapacita, vodivost je zdrojů méně. Pro emisivitu semínek pšenice nebyla nalezena žádná publikace. V článku [18] byla měřena hustota a statický sypný úhel pro různé druhy pšenice, přesněji AK58, ZM175, MM51, ZM9023. Hodnoty hustot se pohybovaly od $1219,3 \text{ kg/m}^3$ do $1376,1 \text{ kg/m}^3$. Statický sypný úhel byl v rozmezí $12,8^\circ$ až $16,3^\circ$. Pouze u studie [19] byly hodnoty mezerovitosti, sypné hmotnosti a hustoty vyjádřeny pomocí průměrů a nejistot, u jiných publikací nebyly nejistoty vyjádřeny. Ve studii [19] byla použita polská odrůda pšenice Hondia s mezerovitostí $0,475 \pm 0,003$; sypná hmotnost byla $721 \pm 4 \text{ kg/m}^3$ a hustota $1371 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ při vlhkosti 11 %. V dalším článku [20] byly měřeny vlastnosti dvou druhů pšenice HI1544 a Lokwan v závislosti na vlhkosti. Nejdříve byly měřeny vlastnosti suché pšenice a potom pšenice, která byla dva dny nechána ve vodě. Mezerovitost se pohybovala od 0,3991 do 0,5655, hodnota sypné hmotnosti se byla od $676,9 \text{ kg/m}^3$ až do $833,1 \text{ kg/m}^3$. Hustota byla v rozmezí $1258,8 \text{ kg/m}^3$ až $1647,7 \text{ kg/m}^3$ a statický sypný úhel byl $29,2^\circ$ až $38,5^\circ$. V další studii [21] byly měřeny vlastnosti následujících odrůd pšenice Ceralio, Korweta, Obelkulmer Rotkorn a Holstenkorn. Každá odrůda měla jinou vlhkost. Mezerovitost se pohybovala od 0,459 do 0,481. Hodnoty sypných hmotností byly v rozmezí 721 kg/m^3 až $749,6 \text{ kg/m}^3$. Statické sypné úhly ležely v intervalu od $17,6^\circ$ až $20,5^\circ$. V článku [22] bylo uskutečněno měření vlastností pšenice Shiraz v závislosti na vlhkosti, která se měnila z 8 % na 18 %. Hodnoty sypné hmotnosti byly $708,4 \text{ kg/m}^3$ pro vlhkost 8 % a 664 kg/m^3 pro vlhkost 18 %. Hustota pšenice se změnila z $1222,4 \text{ kg/m}^3$ na $1177,2 \text{ kg/m}^3$ a statický sypný úhel se zvětšil z $30,3^\circ$ na $36,8^\circ$. Další článek [23] se zabývá vlastnostmi třech odrůd pšenice Simonida, Dragana, NS 40S. Mezerovitost byla v rozmezí 0,2828 až 0,3196. Pro sypnou hmotnost vyšly hodnoty od $731,8 \text{ kg/m}^3$ až $791,3 \text{ kg/m}^3$. Hustota pšenice se pohybovala v rozmezí $1103,5 \text{ kg/m}^3$ až $1150,5 \text{ kg/m}^3$ a statický sypný úhel 18° až $19,8^\circ$ při různých vlhkostech. Pšenice HD-3086 užitá v článku [24] měla mezerovitost 0,3645, sypnou hmotnost $804,8 \text{ kg/m}^3$ a hustotu $1266,4 \text{ kg/m}^3$ při vlhkosti 12,5 %. Studie [25] byla jediná, kde byla měřena tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita bylo měřeno 14 druhů pšenice, proto budeme používat průměrné hodnoty daných vlastností. Průměrná mezerovitost byla 0,385, sypná hmotnost 806 kg/m^3 . Průměrná hustota byla $1310,6 \text{ kg/m}^3$. Měrná tepelná kapacita byla $1829 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ při vlhkosti 12,1 % a teplotě 20°C a změnila se v závislosti na teplotě na $1928 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ při teplotě 25°C . Průměr tepelné vodivosti byl $0,145 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a průměr tepelné difuzivity byl $0,094 \text{ mm}^2/\text{s}$. Jelikož se nepodařilo najít dostatečný počet článků o tepelné difuzivitě semínek pšenice, tak je zde uveden článek [26], který se zabývá difuzivitou pšenice jako plodiny, nikoliv zrna. Byla měřena tepelná difuzivita vzhledem k vlhkosti. Odrůdy použité pšenice byly Eregli, Saruhan a Bulgur. Eregli a Saruhan byly měřeny pro vlhkost 5,9 % a 39,7 % a Bulgur pouze pro 7,3 %. Tepelné difuzivity se pohybovaly od $8,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ do $11,43 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Pro přehlednost jsou všechny hodnoty transportních vlastností, respektive mezerovitost, sypná hmotnost, hustota a statický úhel uvedeny v Tab. 1 a hodnoty termo–fyzikálních vlastností uvedeny v Tab. 2.

Tab. 1 Rešeršně získaná transportní data pšenice

| zdroj | typ pšenice | mezerovitost (-) | sypná hmotnost (kg/m ³) | hustota(kg/m ³) | statický úhel (°) | vlhkost (%) |
|-------|--------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------|
| [18] | AK58 | - | - | 1323 | 13,5 | - |
| | ZM175 | - | - | 1219,3 | 16,3 | - |
| | MM51 | - | - | 1283,1 | 13,9 | - |
| | ZM9023 | - | - | 1376,1 | 12,8 | - |
| [19] | Hondia | 0,475 ± 0,003 | 721 ± 4 | 1371 ± 2 | - | 11 |
| [20] | HI1544 | 0,3991 | 676,9 | 1258,8 | 29,2 | 6,4 |
| | | 0,4802 | 833,1 | 1388,1 | 38 | 41 |
| | Lokwan | 0,5044 | 669,9 | 1485,6 | 32,4 | 8 |
| | | 0,5655 | 816,2 | 1647,7 | 38,5 | 42 |
| [21] | Ceralio | 0,463 | 721 | 1342,7 | 20,3 | 10 |
| | Korweta | 0,473 | 731,6 | 1491,2 | 17,6 | 9,2 |
| | Obelkulmer Rotkorn | 0,459 | 749,6 | 1351,5 | 20,5 | 11,1 |
| | Holsternkorn | 0,481 | 728,1 | 1343,3 | 20,5 | 10 |
| [22] | Shiraz | 0,42 | 708,4 | 1222,4 | 30,3 | 8 |
| | Shiraz | 0,44 | 664 | 1177,2 | 36,8 | 18 |
| [23] | Simonida | 0,2828 | 791,3 | 1103,5 | 19,8 | 15,8 |
| | Dragana | 0,3146 | 788,5 | 1150,5 | 18 | 15,8 |
| | NS 40S | 0,3196 | 731,8 | 1075,6 | 19,6 | 16,4 |
| [24] | HD-3086 | 0,3645 | 804,8 | 1266,4 | - | 12,5 |
| [25] | průměr ze 14 | 0,385 | 806 | 1310,6 | - | 12,1 |

Tab. 2 Rešeršně získaná data pro termo-fyzikální vlastnosti pšenice

| zdroj | typ pšenice | měrná tep. kapacita (J/kg·°C) | tep. vodivost (W/m·K) | tepelná difuzivita (m ² /s) | vlhkost (%) |
|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|-------------|
| [25] | průměr ze 14 | 1829 | 0,145 | 0,094 | 12,1 |
| [26] | Eregli | - | - | 8,92×10 ⁻⁸ | 5,9 |
| | Eregli | - | - | 11,43×10 ⁻⁸ | 39,7 |
| | Saruhan | - | - | 8,76×10 ⁻⁸ | 5,9 |
| | Saruhan | - | - | 10,78×10 ⁻⁸ | 39,7 |
| | Bulgur | - | - | 8,2×10 ⁻⁸ | 7,3 |

3.2 Semena hrachu

Publikací o vlastnostech hrachu není příliš mnoho. Hodnoty mezerovitostí, sypných hmotností a hustot byly uvedeny v každé dohledané publikaci, ale hodnota statického sypného úhlu byla pouze v jedné publikaci. Hodnoty pro měrnou tepelnou kapacitu, emisivitu, difuzivitu a vodivost hrachu nebyly v žádné z dohledaných publikací. V článku [27] byla měřena závislost vlastností na vlhkosti hrachu. Při vlhkosti 9 % byla mezerovitost 0,3864 a 0,4032 při vlhkosti 26 %. Sypná hmotnost byla 712,1 kg/m³ při vlhkosti 9 % a 647,5 kg/m³ při vlhkosti 26 %. Hustota se změnila z 1160,5 kg/m³ při vlhkosti 9 % na 1085 kg/m³ při vlhkosti 26 %. V dalším článku [28] byly opět měřeny vlastnosti v závislosti na vlhkosti hrachu, která byla od 4,5 % do 38 %. Mezerovitost se pohybovala od 0,57 až 0,75. Sypná hmotnost se snižovala od 600 kg/m³ až na 490 kg/m³. Hustota se pohybovala v rozmezí 1350 kg/m³ až 1990 kg/m³. V následujícím článku [29] byla měřena závislost vlastností semínka hrachu na vlhkosti. Odřůda hrachu byla Arkel a vlhkost byla změněna z 13 % až na 22 %. Mezerovitost se pohybovala od 0,4085 do 0,4676. Sypná hmotnost byla v rozmezí 608 kg/m³ až 702 kg/m³. Hustota hrachu byla 1142 kg/m³ až 1187 kg/m³. Statický sypný úhel se zvýšil z 32,6° až na 36,3°. Pro přehlednost všechny hodnoty hrachu jsou zobrazeny v Tab. 3.

Tab. 3 Rešeršně získaná data vlastností hrachu

| zdroj | typ hrachu | mezero- vitost (-) | sypná hmotnost (kg/m ³) | hustota (kg/m ³) | statický úhel (°) | vlhkost (%) |
|-------|------------|-----------------------|--|---------------------------------|----------------------|-------------|
| [27] | - | 0,3864 | 712,1 | 1160,5 | - | 9 |
| | - | 0,4032 | 647,5 | 1085 | - | 26 |
| [28] | - | 0,62 | 600 | 1480 | - | 4,5 |
| | - | 0,57 | 538 | 1350 | - | 14 |
| | - | 0,75 | 490 | 1990 | - | 38 |
| [29] | Arkel | 0,4085 | 702 | 1187 | 32,6 | 13 |
| | Arkel | 0,446 | 647 | 1168 | 34,3 | 20 |
| | Arkel | 0,4676 | 608 | 1142 | 36,3 | 22 |

4 Měření vlastností osiv

Nejprve byly měřeny hodnoty sypné hmotnosti, hustoty, mezerovitosti, statického sypného úhlu a měrné tepelné kapacity pro pšenici. Pro ověření správnosti postupů v experimentech se porovnávají vyhodnocené experimenty s hodnotami získanými v rešeršní části. Pokud hodnoty z experimentů spadají do intervalu hodnot z rešeršní části, lze považovat prováděný postup experimentů za správný. Poté, co jsou postupy ověřeny, se experimenty opakují, tentokrát pro hrách, ke kterému dosud není provedeno dostatečné množství měření.

4.1 Specifikace měřidel

Pro určení nejistoty typu B, je zapotřebí znát specifikace použitých měřidel při experimentech. Všechny hodnoty i výpis experimentů, při kterých byla daná měřidla použita, jsou shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4 Specifikace měřidel

| | výrobce | nejistota měřidla | použito při měření |
|----------------------|-------------------|---------------------------------|--|
| odměrný válec | Simax | 2,5 ml | sypné hmotnosti, hustoty, mezerovitosti |
| metr | Stanley | 0,5 mm | sypného úhlu |
| váhy EK-1200G | A&D Company | 0,2 g | sypné hmotnosti, hustoty, mezerovitosti, měrné tep. kapacity |
| termometr TM-947SD | Lutron electronic | 0,4 % z měřené hodnoty + 0,5 °C | měrné tep. kapacity |
| termočlánek GTF 400 | Greysinger | 1,5 °C | měrné tep. kapacity |
| termočlánek GTF 1200 | Greysinger | 1,5 °C | měrné tep. kapacity |
| Sušárna 55 Standard | Venticell | 1 % z měřené hodnoty | měrné tep. kapacity |

Výsledné hodnoty následujících experimentů byly doplněny o nejistoty. Odhad a výpočet výsledných nejistot přímého i nepřímého měření byl proveden dle [30] [31] [32].

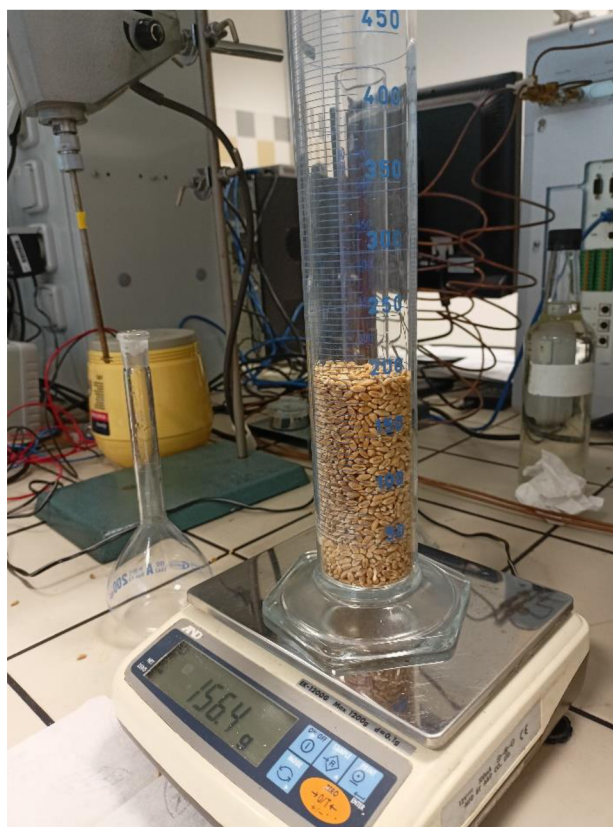
4.2 Měření sypné hmotnosti

V technické praxi je způsob měření sypné hmotnosti předepsán např. normou [33], v níž látkou pro měření sypné hmotnosti jsou tuhá biopaliva např.: dřevní pelety, piliny, rašelina. Postup experimentu lze aplikovat i na osivo, jelikož je to také sypký materiál podobného charakteru.

Postup normy [33] uvádí, že se nejdříve stanoví hmotnost a plnicí objem nádoby. Na váhách se zváží prázdná, čistá a suchá nádoba. Poté se naplní vodou s několika kapkami zvlhčujícího činidla až do maximálního objemu. Potom se nádoba opět zváží. Voda by měla být vytemperována mezi 10 °C a 20 °C. Z čisté hmotnosti vody a hustoty vody se vypočítá objem nádoby a zaznamená se výsledek zaokrouhlený na 0,01 l pro velkou nádobu nebo na 0,001 l pro malou nádobu. Vliv teploty na hustotu vody se zanedbává. Do nádoby se sype vzorek

z výšky 200 mm až 300 mm nad horním okrajem, dokud se nevytvoří kužel maximální možné výšky. Naplněná nádoba se setřepe nárazem. To se provede volným upuštěním nádoby z výšky 150 mm na dřevěnou desku. Zajistí se, aby nádoba do dřevěné desky narazila ve svislé poloze. Náraz se opakuje ještě dvakrát. Potom vzniklý prázdný prostor se doplní. Přebytek materiálu se odstraní hranolem, který se posouvá kmitavými pohyby po hraně nádoby. Nádoba se zbývajícím materiálem vzorku se zváží. Ihned po stanovení sypné hmotnosti se ve zkušebním vzorku v původním stavu stanoví obsah vody.

Experiment v rámci této práce byl proveden podle zmíněné normy, pouze se liší v tom, že objem nádoby nebyl měřen, ale byl použit odměrný válec se stupnicí, kde jeden dílek je 5 ml a přesnost lze určit jako polovina dílku, tedy $\pm 2,5$ ml. Postup byl zvolen následující. Pro měření sypné hmotnosti se nejdříve zváží odměrný válec na vahách s přesností na desetinu gramu, ty se nastaví na hodnotu nula. Do odměrného válce se nasype pšenice, aby zaujímala objem 200 ml a poté se válec s pšenicí zváží na vahách, viz Obr. 2. Pro výpočet sypné hmotnosti se využije rovnice (7). Bylo provedeno 10 opakování daného měření, z nichž byla vypočtena průměrná hodnota $(0,81 \pm 0,02)$ g/cm³ pro pšenici a $(0,84 \pm 0,01)$ g/cm³ pro hrách. Nejistotu ovlivňuje hmotnost, objem, počet měření, míra setřesení pšenice, přesnost odečtu z odměrného válce a přesnost vah. Použitá měřidla v tomto experimentu jsou odměrný válec a váhy, jejich specifikace je uvedena v Tab. 4.



Obr. 2 Odměrný válec s pšenicí

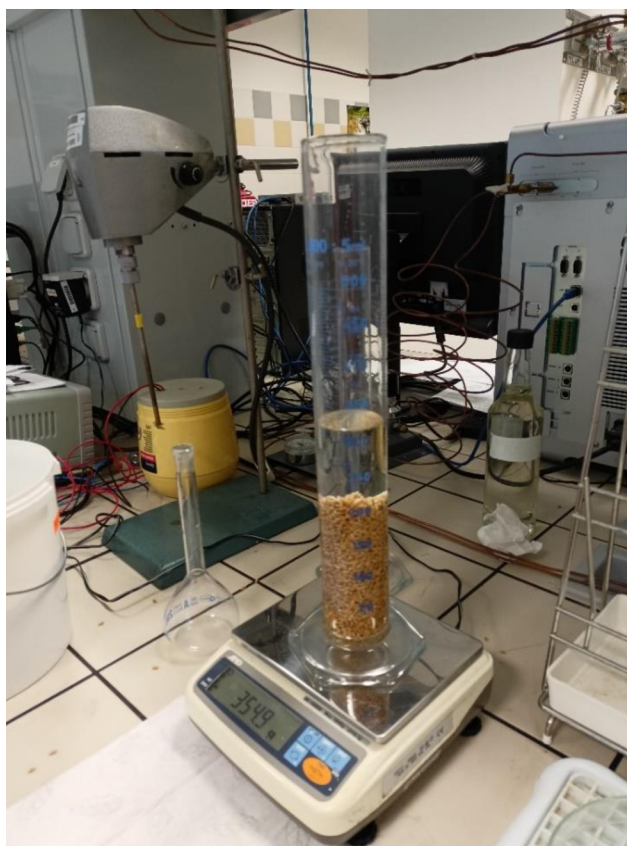
4.3 Měření hustoty

Běžný způsob měření hustoty v technické praxi je předepsán normou [34]. Látkou pro měření hustoty dle normy jsou nelehčené plasty. Objem zkušebního tělesa o známé stanovené hmotnosti se určí měřením změny objemu plynu v pyknometru po zavedení zkušebního tělesa. Změnu objemu lze získat pomocí pohyblivého pístu, nebo nepřímo měřením změny tlaku

v pyknometru a vypočtením objemu pomocí stavové rovnice ideálního plynu. Takto se získá objem pouze samotné pevné látky bez jejich pórů. Hustota se vypočte pomocí rovnice (3) [34].

Použití pyknometru není možné, protože semínka pšenice jsou příliš velká na to, aby se vešla do pyknometru, proto se nepostupuje podle normy, ale pro stanovení hustoty se použije následující postup.

K vypočítání hustoty je zapotřebí zjistit hmotnost a objem pšenice. Pro zjištění hmotnosti se použije stejný princip jako při měření sypané hmotnosti, Obr. 2. Poté se odlije do baňky 200 ml vody. Pomocí baňky se objem vody přelije do odměrného válce s pšenicí, viz Obr. 3. Nalítá voda v odměrném válci vytlačuje vzduch z mezer mezi semínky. Výsledná nejistota může být závislá i na nevytlačení vzduchu z mezer. Ten se odstraní např.: třepáním válce nebo nárazem válce o ruku (aby se odměrný válec nerozbil). Pro zjištění objemu pšenice se udělá rozdíl objemu vody a výsledného objemu pšenice s vodou. Bylo uskutečněno 10 měření, z nichž dle rovnice (3) byla vypočtena průměrná hustota $(1,27 \pm 0,06) \text{ g/cm}^3$ pro pšenicí a $(1,35 \pm 0,06) \text{ g/cm}^3$ pro hrách. Nejistotu ovlivňuje hmotnost, objem, přesnost vah, přesnost odečtu z odměrného válce a počet opakování. Specifikace měřidel pro hustotu, tedy odměrný válec a váhy, jsou poznačeny v Tab. 4.



Obr. 3 Odměrný válec pšenice s vodou

4.4 Měření mezerovitost

V technické praxi se mezerovitost měří podle normy [35], která předepisuje postup měření mezerovitosti pro volně sypané kamenivo. Postup experimentu lze aplikovat i na osivo, které je také volně sypané.

Podle normy [35] se nejprve zjistí hmotnost vysušeného kameniva v odměrné nádobě a vypočte se sypaná hmotnost volně sypaného kameniva. Mezerovitost v procentech se vypočte ze sypané hmotnosti volně sypaného kameniva a objemové hmotnosti zrn kameniva.

Měření bylo provedeno podle normy, jelikož byl uvažován málo porézní materiál (semínka), tak byla objemová hmotnost nahrazena hustotou. Pro měření mezerovitosti bylo využito předchozích měření hustoty a sypné hmotnosti. Poté byla vypočítána průměrná mezerovitost z rovnice (13). Výsledná hodnota mezerovitosti vyšla $0,37 \pm 0,03$ pro pšenici a $0,38 \pm 0,03$ pro hrách. Výslednou nejistotu ovlivňuje hmotnost, objem, počet měření, míra setřesení pšenice, přesnost odečtu z odměrného válce a přesnost vah. Měřidla použitá pro stanovení mezerovitosti jsou odměrný válec a váhy, která jsou specifikována v Tab. 4.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho'_s}{\rho} \quad (13)$$

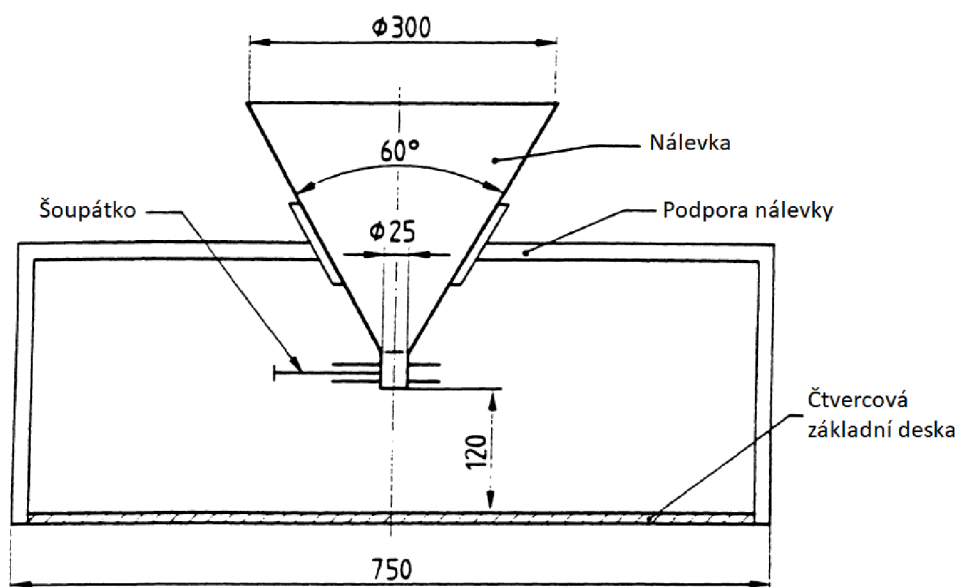
4.5 Měření sypného úhlu

Měření sypného úhlu stanovuje norma [36], která uvádí stanovení sypného úhlu tuhých průmyslových hnojiv. Postup lze aplikovat i na osiva, jelikož hnojivo i osivo lze posoudit jako sypký materiál.

Podle normy [36] se nejprve nalije zkušební vzorek do nálevky, ve tvaru trychtýře, s uzavřeným šoupátkem. Poté se šoupátko otevře a hnojivo se nechá vytékat stálým proudem, přičemž je nutné dbát na to, aby zařízení na Obr. 4 nevíbrovalo. Není-li množství hnojiva dostatečné, tedy vršek kužele, který je vytvářen na základní desce, nedosahuje ke špičce hrdla nálevky, je nalito do nálevky další množství zkušební vzorku stálým proudem, šoupátko je stále otevřené, dokud horní část kužele nedosáhne špičky trychtýře. Obvod základny kužele je označen na osmi poloměrech nakreslených na základní desce. Zrna, která tvoří pouze jednu vrstvu kolem základny kužele, jsou ignorována. Hnojivo je odebráno ze základní desky a jsou změřeny čtyři označené průměry. Statický sypný úhel se pak spočítá z rovnice (14).

$$\theta_s = \arctg \frac{2h}{\bar{d} - d_i} \quad (14)$$

kde: \bar{d} (m) je aritmetický průměr ze čtyř měřených průměrů kužele
 d_i (m) je vnitřní průměr trychtýřové nálevky



Obr. 4 Zařízení pro stanovení statického sypného úhlu. Upraveno dle [36].

V rámci vybavení laboratoře nebylo k dispozici dané zařízení, proto se experiment lišil. V tomto experimentu je zapotřebí dutého válce (např. kus trubky) a podložky. Dutý válec je položen na podložku a naplněn pšenici viz Obr. 5, poté válec je rychle zdvižen a pšenice vytvoří sypný kužel, viz Obr. 6, který je vyfocen na fotoaparát. Poté jsou z fotografie odečteny hodnoty výšek a průměrů. Pomocí metru jsme schopni odečíst hodnotu výšky na Obr. 6. Poté zaznačíme na podložku tři průměry kužele a následně odstraníme veškerou pšenici viz Obr. 7. Metrem změříme hodnoty průměrů. Výpočet sypného úhlu byl dle rovnice (1). Bylo provedeno 8 měření a výsledný průměr sypných úhlů je $(15 \pm 2)^\circ$ pro pšenici. Měřený sypný úhel byl oproti rešeršně získaným hodnotám menší, mohlo to být způsobeno provedenou metodou experimentu, jelikož aparát pro zjištění sypného úhlu nebyl v laboratoři k dispozici, ale také i tím, že odrůda pšenice nebyla známa a oproti rešeršním hodnotám velice suchá. Proto měření sypného úhlu nebylo uskutečněno pro hrách. Celkovou nejistotu ovlivňuje povrch podložky, povrch dutého válce, množství semínek ve válci, počet opakování experimentu a přesnost odečtu z fotografie. Použité měřidlo byl svinovací metr, jeho specifikace je uvedena v Tab. 4.



Obr. 5 Dutý válec s pšenici



Obr. 6 Sypný kužel vyfocen fotoaparátom



Obr. 7 Průměry sypného kužele

4.6 Měření měrné tepelné kapacity

Měření měrné tepelné kapacity uvádí norma [37] pro plasty. Postup lze použít i u osiva. Norma [37] popisuje, že zkušební vzorek, v případě potřeby utěsněný v kelímku, se zahřeje na požadovanou teplotu zavěšený ve vertikální trubkové peci umístěné nad přijímacím kalorimetrem. Uzávěr zabraňuje sálavému teplu z pece, aby se dostalo do kalorimetru. Kalorimetr může být jakékoli vhodné zařízení pro záznam celkového množství tepla odebraného ze zkušebního kusu za účelem jeho ochlazení na okolní teplotu. Zkušební kus nebo kelímek obsahující zkušební kus se nechá spadnout uzávěrem do kalorimetru. Odezva kalorimetru je nepřetržitě monitorována. Je analyzována výstupní křivka, která zahrnuje kalibrovanou odezvu kalorimetru a kelímku, pokud je použit, a vypočítá se střední měrná tepelná kapacita.

Vybavení laboratoře neumožňuje postup dle normy, proto se experiment liší. Pro měření měrné tepelné kapacity je důležité nejdříve experimentálně změřit hodnotu konstanty kalorimetru, která vystupuje v rovnici pro měrnou tepelnou kapacitu (15). Konstanta kalorimetru byla poskytnuta vedoucím práce na základě dříve prováděných experimentů, určí se z rovnice (16). Průměrná hodnota konstanty kalorimetru byla $(217 \pm 136,2) \text{ J/}^\circ\text{C}$. Poté co je konstanta naměřena, se nasype pšenice do kádinky, která se zváží a vloží se do ní termočlánek pro měření teploty pšenice. Kádinka se poté vloží do sušárny s cirkulací vzduchu a je nutno počkat, dokud nebude teplota pšenice okolo $77 \text{ }^\circ\text{C}$, u hrachu okolo $66 \text{ }^\circ\text{C}$. Na základě mírné vůně po sušení lze soudit, že docházelo k mírnému pražení osiv, což bylo později ověřeno vedoucím práce na základě měření úbytku hmotnosti, který byl větší, než by odpovídal pouze sušení (pro hrách vyšel průměrný úbytek hmotnosti, při ohřevu hrachu na zhruba $69 \text{ }^\circ\text{C}$, na hodnotu $0,7 \%$ původní hmotnosti hrachu), proto není vhodné překračovat dané teploty. V průběhu ohřívání pšenice se do kalorimetru nalije voda o známé hmotnosti a teplotě. Poté co je teplota pšenice v sušárně dostatečně vysoká se teplota poznačí a kádinka se vyjme ze sušárny a nasype se do připraveného kalorimetru s vodou. Je zapotřebí postupovat velmi rychle, aby teplota pšenice co nejméně klesla, protože rozdíl poznačené a reálné hodnoty teploty hraje velkou roli ve výsledné nejistotě. Kalorimetr se uzavře a začne se intenzivně míchat, aby se dostatečně smísila voda s pšenicí. Po ustálení tepelné rovnováhy se pomocí termočláneků změří teplota směsi viz Obr. 8. Z 10 měření byla vypočítána průměrná hodnota měrné tepelné kapacity z rovnice (15) $(1588,6 \pm 274,7) \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ při průměrné vlhkosti $0,75 \%$ pro pšenici a $(1812 \pm 316) \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ při průměrné vlhkosti $0,55 \%$ pro hrách. Jelikož se jedná o velmi suchý vzorek, snadno lze vypočítat měrné tepelné kapacity pro různou vlhkost viz rovnice (9). Do výpočtu výsledné nejistoty vstupuje více faktorů, a to nejistoty měřicích přístrojů, dále přesun semínek ze sušárny do kalorimetru (mohly se ochladit), mísením semínek s vodou v kalorimetru, jelikož bylo prováděno třepáním kalorimetru, počet opakování experimentu. Významná část nejistoty je dána měření konstanty kalorimetru vedoucím. Od vedoucího bylo sděleno, že byl použit nevhodný termočlánek pro měření teploty horké vody, to se promítlo do nejistoty konstanty kalorimetru a dále i do nejistoty měrné tepelné kapacity. Kdyby nejistota kalorimetru byla nulová, výsledná měrná tepelná kapacita by vyšla $(1588,6 \pm 184,9) \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ pro pšenici a $(1812 \pm 206) \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ pro hrách. Specifikace použitých měřidel (váhy, termočlánek, termometr, sušárna) jsou poznačeny v Tab. 4.

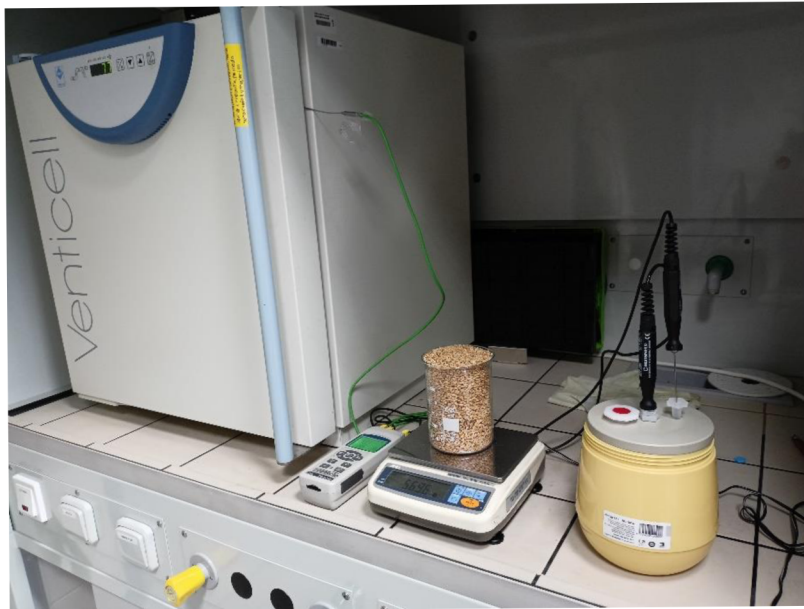
$$c_p = \frac{(m_v \cdot c_v + K) \cdot (t - t_v)}{m_p \cdot (t_p - t)} \quad (15)$$

kde: $c_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ je měrná tepelná kapacita pšenice
 $c_v \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ je měrná tepelná kapacita vody
 $K \text{ (J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ je konstanta kalorimetru
 $m_v \text{ (kg)}$ je hmotnost vody
 $m_p \text{ (kg)}$ je hmotnost pšenice
 $t_v \text{ (}^\circ\text{C)}$ je teplota vody
 $t_p \text{ (}^\circ\text{C)}$ je teplota pšenice
 $t \text{ (}^\circ\text{C)}$ je teplota směsi

$$K = \frac{c_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t) - c_1 \cdot m_1 \cdot (t - t_1)}{(t - t_1)} \quad (16)$$

kde: $c_1 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ je měrná tepelná kapacita studené vody
 $c_2 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ je měrná tepelná kapacita teplé vody

m_1 (kg) je hmotnosť studenej vody
 m_2 (kg) je hmotnosť teplej vody
 t_1 (°C) je teplota studenej vody
 t_2 (°C) je teplota teplej vody



Obr. 8 Kalorimetr a sušárna

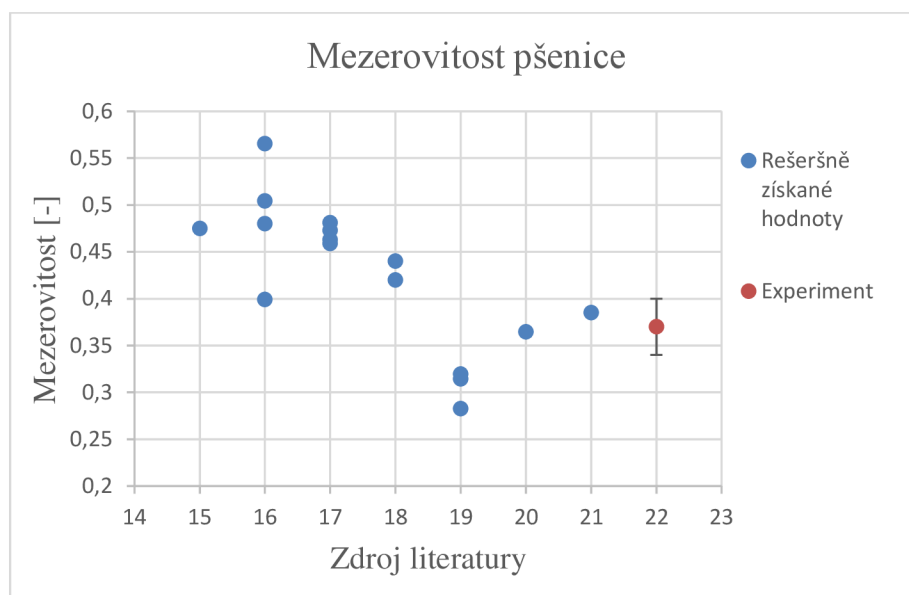
5 Vyhodnocení experimentů

Výsledky experimentů jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 5. Hodnota měrné tepelné kapacity byla měřena při vlhkosti v závorce, zbylé vlastnosti při vlhkosti před závorkou. Jelikož se jedná o velmi suché vzorky jak pšenice, tak i hrách, snadno lze vypočítat měrné tepelné kapacity pro různou vlhkost viz rovnice (9).

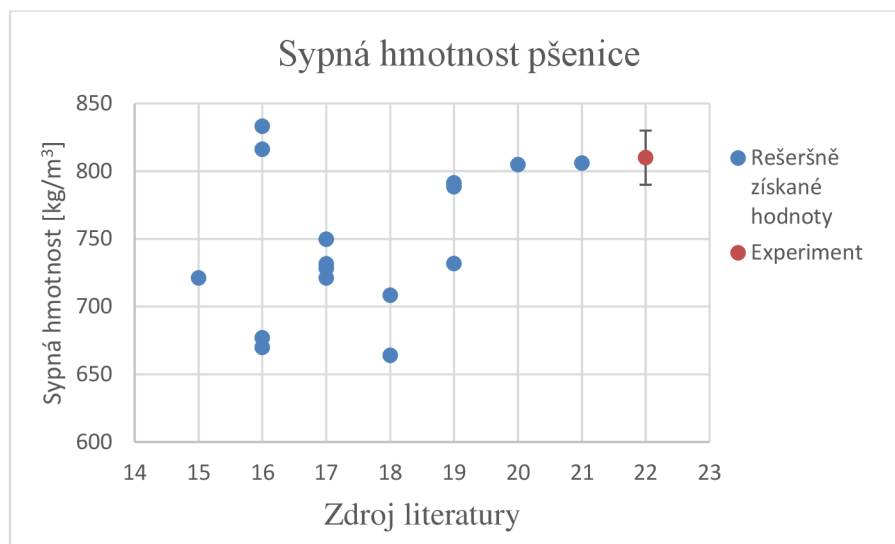
Tab. 5 Průměrné hodnoty měřených vlastností a jejich krajní chyby

| zdroj | Experiment | Experiment |
|--|--------------------|-----------------|
| typ osiva | pšenice | hrách |
| mezerovitost (-) | $0,37 \pm 0,03$ | $0,38 \pm 0,03$ |
| sypná hmotnost (kg/m^3) | 810 ± 20 | 840 ± 10 |
| hustota (kg/m^3) | 1270 ± 60 | 1350 ± 60 |
| statický úhel ($^\circ$) | 15 ± 2 | - |
| měrná tep kapacita ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$) | $1588,6 \pm 274,7$ | 1812 ± 316 |
| vlhkost (%) | 1,28 (0,75) | 0,55 |

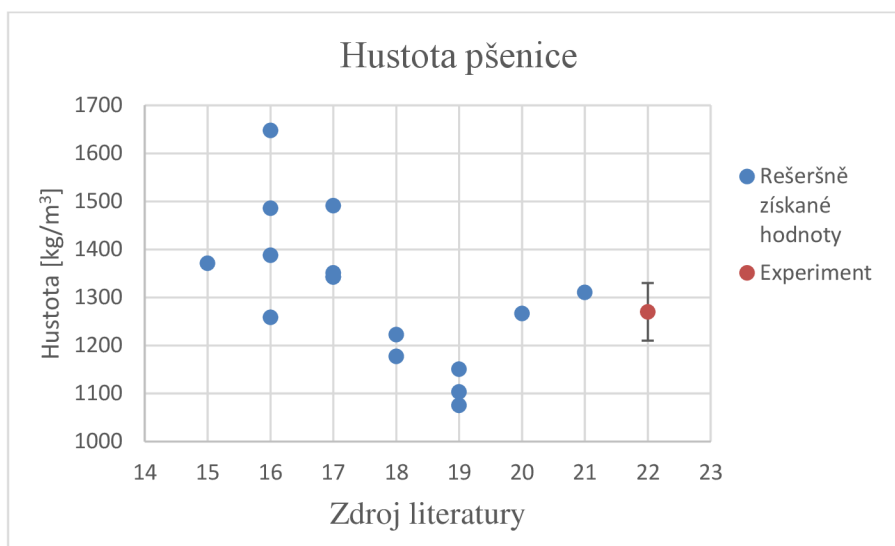
Při porovnání hodnot pro pšenici z Tab. 5 (z vlastních měření) a hodnot z Tab. 1 (publikované rozsahy hodnot), tak hodnoty jsou velmi blízké a při započítání krajní chyby se hodnoty z Tab. 1 vyskytují v rozsahu hodnot publikovaných jinými autory v Tab. 5. V publikacích jsou však různé odrůdy pro pšenici, při různých vlhkostech, což zvětšuje rozsah hodnot. Odrůda použité pšenice v experimentech není známa, ale hodnoty experimentů spadají do typického rozsahu hodnot pro různé odrůdy. Pouze statický sypný úhel se shoduje s menším množstvím hodnot. Může to být způsobeno provedením experimentu, jelikož nebyl proveden podle normy, ale upraven tak, aby byl v laboratoři uskutečnitelný. Rozdílné hodnoty jsou dány hlavně odrůdou pšenice, která je v experimentech použita. Postupy experimentů ovlivňují výslednou hodnotu, jelikož každá vlastnost se dá měřit více způsoby. Porovnání hodnot z řešeršů a experimentální části lze vidět na obrázcích 9–12 viz Obr. 9, Obr. 10, Obr. 11 a Obr. 12.



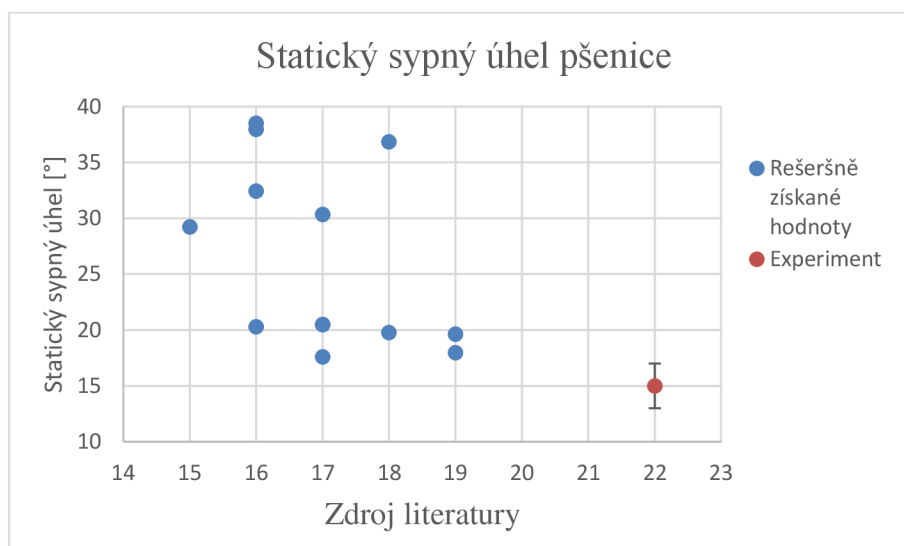
Obr. 9 Mezerovitost pšenice



Obr. 10 Sypná hmotnost pšenice

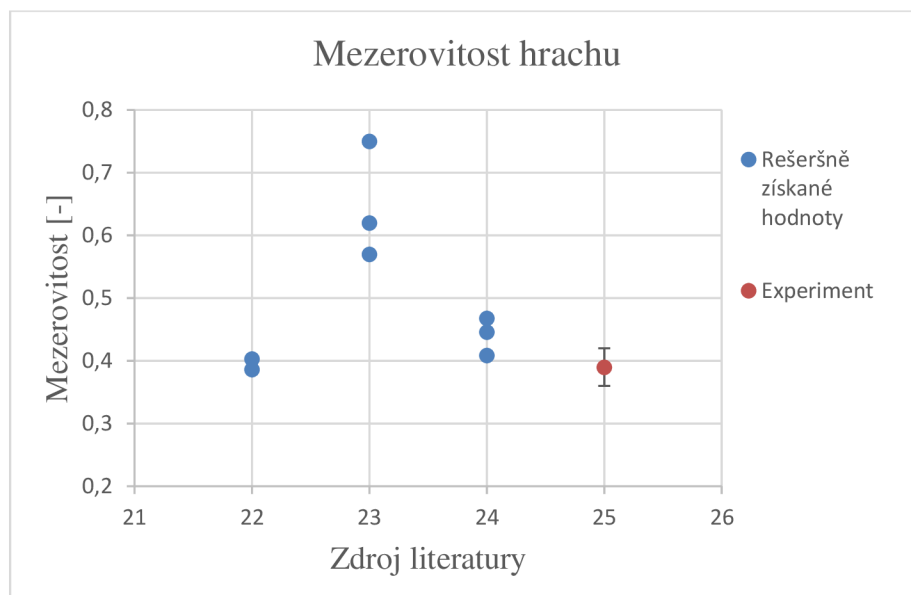


Obr. 11 Hustota pšenice

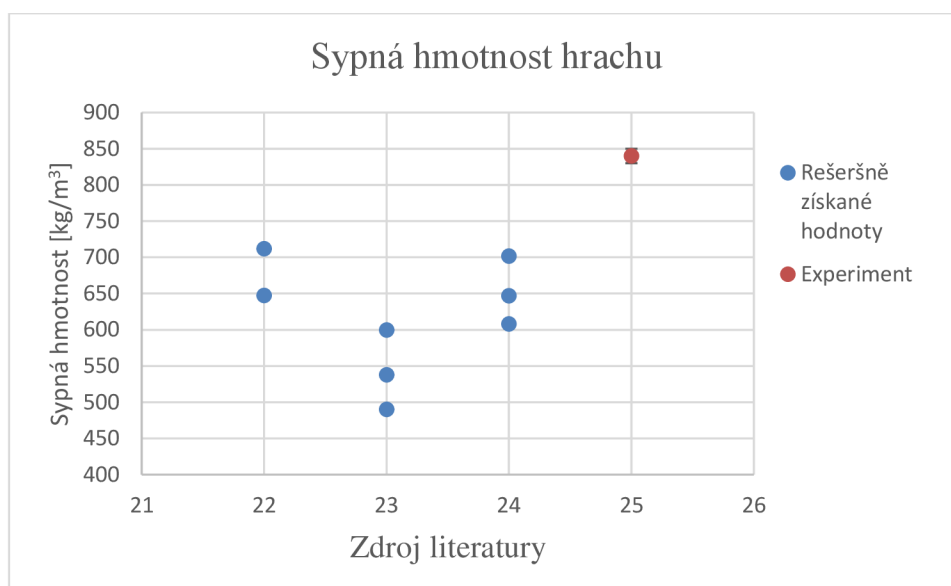


Obr. 12 Statický sypný úhel pšenice

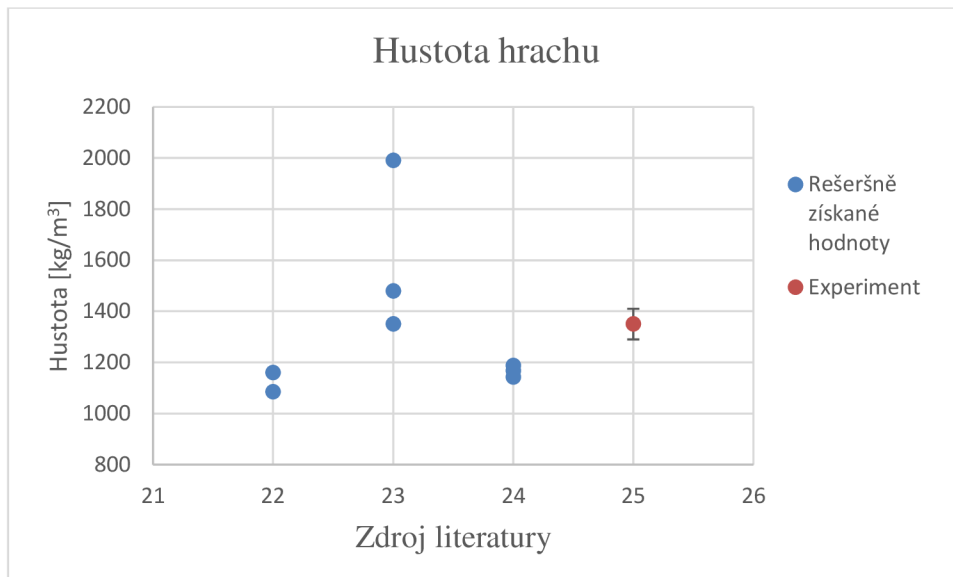
Hodnoty sypané hmotnosti hrachu se liší, ale to je také dáno tím, že do dnešní doby není uskutečněno velké množství experimentů, tím pádem není velký vzorek dat pro porovnání. Rozdíl hodnot je dán i tím, jaká je použita odrůda hrachu, typ experimentu a vlhkost hrachu. Odrůda použitého hrachu v experimentech není známa. Jelikož byly experimenty prováděny stejně jako u pšenice, která se liší od rešeršně získaných dat pouze minimálně viz Obr. 9, Obr. 10, Obr. 11 a Obr. 12, lze považovat hodnoty hrachu za reprezentativní. Porovnání hodnot pro hrách z rešeršní a experimentální části lze vidět na obrázcích 13–15 viz Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15.



Obr. 13 Mezerovitost hrachu



Obr. 14 Sypná hmotnost hrachu



Obr. 15 Hustota hrachu

Závěr

Hlavním cílem práce bylo rešeršně získat termo–fyzikální a transportní data pro semínka pšenice a hrachu a poté je ověřit a doplnit vlastními experimenty. Tyto data jsou důležitá pro provedení termické sanitace osiv, která byla vyhodnocena jako ekonomičtější a ekologičtější než chemické ošetření osiv.

Z rešerše je získáno, že informací ohledně transportních vlastností je velké množství, avšak pro termo–fyzikální vlastnosti je publikací méně. Publikací o vlastnostech hrachu, jak transportních, tak i termo–fyzikálních je velmi málo.

Při vlhkosti pšenice 1,28 % a hrachu 0,55 % byly provedeny experimenty, ze kterých se získaly následující vlastnosti:

- Mezerovitost byla $(0,37 \pm 0,03)$ pro pšenici a $(0,38 \pm 0,03)$ pro hrách
- Sypná hmotnost vyšla (810 ± 20) kg/m³ pro pšenici a (840 ± 10) kg/m³ pro hrách
- Hustota byla pro pšenici (1270 ± 60) kg/m³ a pro hrách (1350 ± 60) kg/m³
- Statický sypný úhel byl $(15 \pm 2)^\circ$ pro pšenici a pro hrách nebyl měřen
- Měrná tepelná kapacita pšenice byla měřena při vlhkosti 0,75 % a vyšla $(1588,6 \pm 274,7)$ J/kg·°C a hrachu (1812 ± 316) J/kg·°C

Z rozdílných hodnot rešeršních a experimentálních sypných úhlů lze uvažovat, že dané hodnoty pro sypný úhel nejsou reprezentativní a experiment by se měl znovu uskutečnit, tentokrát s lepším vybavením.

Ostatní hodnoty se dají považovat za reprezentativní a lze je použít při navrhování aparátu pro termickou sanitaci. Pro návrh aparátu pro termickou sanitaci by bylo ovšem důležité ještě experimentálně zjistit zbylé vlastnosti jako jsou tepelná vodivost, tepelná difuzivita a emisivita.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Farm to Fork = Od zemědělece ke spotřebiteli, *Wormup - slané výrobky z hmyzu*. [https://www.wormup.com/clanek/farm-fork-od-zemedelce-ke-spotrebite-
lovi?gad=1&gclid=CjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNGx2gA2Fsk6maDnw-
FaoDJ4oPJU0MjIMEmQRv7BzEV4CK3VS7fNN6RoCs5cQAvD_BwE](https://www.wormup.com/clanek/farm-fork-od-zemedelce-ke-spotrebite-lovi?gad=1&gclid=CjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNGx2gA2Fsk6maDnw-FaoDJ4oPJU0MjIMEmQRv7BzEV4CK3VS7fNN6RoCs5cQAvD_BwE)
- [2] V. TYAGI, India's agriculture: challenges for growth & development in present scenario, roč. 2, č. 5, s. 116–128, 2012.
- [3] Md. M.-E. RAHMAN, E. ALI, a M. ALI, Hot water thermal treatment for controlling seed-borne mycoflora of maize, *Crops Prod.*, roč. 3, led. 2008.
- [4] K. K. SHARMA, U. S. SINGH, P. SHARMA, A. KUMAR, a L. SHARMA, Seed treatments for sustainable agriculture-A review, *J. Appl. Nat. Sci.*, roč. 7, č. 1, s. 521–539, čer. 2015, doi: 10.31018/jans.v7i1.641.
- [5] G. FORSBERG, L. KRISTENSEN, P. EIBEL, P. TITONE, a W. HARTL, Sensitivity of cereal seeds to short duration treatment with hot, humid air, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, roč. 110, s. 1–16, led. 2003.
- [6] The Role of seed treatment in modern U.S. crop production: A review of benefits. Crop Life Foundation, 2013. [Online]. Dostupné z: [https://static1.squarespace.com/static/59b55b2b37c581fbf88309c2/t/5a2a7f8871c10bf01d01a7aa/1512734670130/The+Rol
e+of+Seed+Treatment+in+Modern+US+Crop+Production.pdf](https://static1.squarespace.com/static/59b55b2b37c581fbf88309c2/t/5a2a7f8871c10bf01d01a7aa/1512734670130/The+Role+of+Seed+Treatment+in+Modern+US+Crop+Production.pdf)
- [7] J. EHRENBERGEROVÁ, *Odrůdy, osivo a sadba*, Vyd. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014.
- [8] S. T. NAMETH, Priorities in seed pathology research, *Sci. Agric.*, roč. 55, led. 1998, doi: 10.1590/S0103-90161998000500017.
- [9] A. MOEINZADEH, F. SHARIF-ZADEH, M. AHMADZADEH, a F. TAJABADI, Bio-priming of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed with *Pseudomonas fluorescens* for improvement of seed invigoration and seedling growth, *Aust. J. Crop Sci.*, 2010, Viděno: 30. květen 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.semanticscholar.org/paper/Bi-
o-priming-of-sunflower-\(Helianthus-annuus-L.\)-seed-Moeinzadeh-Sharif-za-
deh/0a887cf50370379d0c0df60345fad6090d62569b](https://www.semanticscholar.org/paper/Bio-priming-of-sunflower-(Helianthus-annuus-L.)-seed-Moeinzadeh-Sharif-zadeh/0a887cf50370379d0c0df60345fad6090d62569b)
- [10] R. LANCASTER, Vegetable seed treatment, *Department of Primary Industries and Regional Development*, 9. červenec 2014. [https://www.agric.wa.gov.au/vegetables/vege-
table-seed-treatments?nopaging=1](https://www.agric.wa.gov.au/vegetables/vegetable-seed-treatments?nopaging=1)
- [11] D. E. EVANS, G. R. THORPE, a T. DERMOTT, The disinfection of wheat in a continuous-flow fluidized bed, *J. Stored Prod. Res.*, roč. 19, č. 3, s. 125–137, čvc. 1983, doi: 10.1016/0022-474X(83)90044-9.
- [12] L. COUTURE a J. SUTTON, Effect of dry heat treatments on survival of seed borne *Bipolaris sorokiniana* and germination of barley seeds., *Can. Plant Dis. Surv.*, 1980, Viděno: 22. květen 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.semanticscholar.org/pa-
per/Effect-of-dry-heat-treatments-on-survival-of-seed-Couture-Sut-
ton/598d3c68b14ed09acbe197d7e206937ed814f83f](https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-dry-heat-treatments-on-survival-of-seed-Couture-Sutton/598d3c68b14ed09acbe197d7e206937ed814f83f)

- [13] G. J. THOMAS a K. G. ADCOCK, Exposure to dry heat reduces anthracnose infection of lupin seed, *Australas. Plant Pathol.*, roč. 33, č. 4, s. 537–540, pro. 2004, doi: 10.1071/AP04057.
- [14] S. PEDRINI, D. J. MERRITT, J. STEVENS, a K. DIXON, Seed Coating: Science or Marketing Spin?, *Trends Plant Sci.*, roč. 22, č. 2, s. 106–116, úno. 2017, doi: 10.1016/j.tplants.2016.11.002.
- [15] T. JAVED *et al.*, Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance, *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, roč. 21, č. 8, s. 536–545, pro. 2022, doi: 10.1016/j.jssas.2022.03.003.
- [16] G. HACISALIHOGU, D. H. PAINE, M. B. HILDERBRAND, A. A. KHAN, a A. G. TAYLOR, Embryo Elongation and Germination Rates as Sensitive Indicators of Lettuce Seed Quality: Priming and Aging Studies, *HortScience*, roč. 34, č. 7, s. 1240–1243, pro. 1999, doi: 10.21273/HORTSCI.34.7.1240.
- [17] J. MEDEK, *Mechanické pochody*, Vyd. 3., Příprac., roč. 1998. Brno: PC-DIR Real.
- [18] K. SUN *et al.*, A DEM-based general modelling method and experimental verification for wheat seeds, *Powder Technol.*, roč. 401, s. 117353, bř. 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2022.117353.
- [19] J. HORABIK *et al.*, Calibration of discrete-element-method model parameters of bulk wheat for storage, *Biosyst. Eng.*, roč. 200, s. 298–314, pro. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.10.010.
- [20] M. L. JADHAV, M. DIN, B. M. NANDEDE, a M. KUMAR, Engineering Properties of Paddy and Wheat Seeds in Context to Design of Pneumatic Metering Devices, *J. Inst. Eng. India Ser. A*, roč. 101, č. 2, s. 281–292, čer. 2020, doi: 10.1007/s40030-019-00430-7.
- [21] M. MARKOWSKI, K. ŻUK-GOŁASZEWSKA, a D. KWIATKOWSKI, Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat, *Ind. Crops Prod.*, roč. 47, s. 113–117, kvě. 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.02.024.
- [22] M. KARIMI, K. K. A. TABATABAEEFAR, K. G.M, N. M, a K. HEIDARBEIGI, The Effect of Moisture Content on Physical Properties of Wheat, *Pak. J. Nutr.*, roč. 8, led. 2009, doi: 10.3923/pjn.2009.90.95.
- [23] L. BABIĆ *et al.*, Physical and stress-strain properties of wheat (*Triticum aestivum*) kernel, *J. Sci. Food Agric.*, roč. 91, s. 1236–43, kvě. 2011, doi: 10.1002/jsfa.4305.
- [24] H. KUMAR, V. K. VIJAY, P. M. V. SUBBARAO, a R. CHANDRA, Studies on the application of bio-carbon dioxide as controlled atmosphere on pest management in wheat grain storage, *J. Stored Prod. Res.*, roč. 95, s. 101911, led. 2022, doi: 10.1016/j.jspr.2021.101911.
- [25] E. ROPELEWSKA, Effect of grinding on thermal properties of wheat grain, *J. Consum. Prot. Food Saf.*, roč. 14, č. 2, s. 139–146, čer. 2019, doi: 10.1007/s00003-018-1200-y.

- [26] S. TAVMAN, I. H. TAVMAN, a S. EVCIN, Measurement of thermal diffusivity of granular food materials, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, roč. 24, č. 7, s. 945–953, lis. 1997, doi: 10.1016/S0735-1933(97)00080-8.
- [27] İ. YALÇIN, C. ÖZARSLAN, a T. AKBAŞ, Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed, *J. Food Eng.*, roč. 79, č. 2, s. 731–735, bře. 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.02.039.
- [28] M. PAKSOY a C. AYDIN, Determination of Some Physical and Mechanical Properties of Pea (*Pisum sativum* L.) Seeds, *Pak. J. Biol. Sci.*, roč. 9, č. 1, s. 26–29, 2006.
- [29] M. K. MAHAWAR, D. V. K. SAMUEL, J. P. SINHA, a K. JALGAONKAR, Moisture-Dependent Physical and Physiological Properties of Accelerated Aged Pea (*Pisum sativum* L.) Seeds, *Curr. Sci.*, roč. 114, č. 04, s. 909, úno. 2018, doi: 10.18520/cs/v114/i04/909-915.
- [30] PALENČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření vyjadřování nejistot. *Automa*. roč. 7 (2001), č. 7-8, s. 50-54.
- [31] PALENČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa*. roč. 7 (2001), č. 10, s. 52-56.
- [32] PALENČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. *Automa*. roč. 7 (2001), č. 12,
- [33] ČSN EN ISO 17828. *Tuhá biopaliva – Stanovení sypné hmotnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 16 s. Třídící znak 83 8215.
- [34] ČSN EN 1183-3. *Plasty – Stanovení hustoty nelehčených plastů – Část 3: Metoda plynového pyknometru*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2000, 12 s. Třídící znak 64 0111.
- [35] ČSN EN 1097-3. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1999, 16 s. Třídící znak 72 1194.
- [36] ČSN EN 12047. *Měření sypného úhlu tuhých průmyslových hnojiv*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1998, 12 s. Třídící znak 65 4809.
- [37] ČSN EN 821-3. *Speciální technická keramika – Monolitická keramika – Termofyzikální vlastnosti – Část 3: Stanovení měrné tepelné kapacity*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005, 24 s. Třídící znak 72 7535.

Seznam použitých zkratk a symbolů

| Symbol | Význam | Jednotka |
|-----------------|---|-------------------|
| c | měrná tepelná kapacita | J/kg·°C |
| c_1 | měrná tepelná kapacita studené vody | J/kg·°C |
| c_2 | měrná tepelná kapacita teplé vody | J/kg·°C |
| c_p | měrná tepelná kapacita za stálého tlaku | J/kg·°C |
| c_p | měrná tepelná kapacita pšenice | J/kg·°C |
| c_v | měrná tepelná kapacita vody | J/kg·°C |
| d_i | vnitřní průměr trychtýřové nálevky | m |
| \bar{d} | aritmetický průměr z měřených průměrů kužele | m |
| D_p | průměr kužele | m |
| dQ | Teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti m o teplotu dT | J |
| dT | infinitesimální změna teploty | K |
| h | výška kužele | m |
| K | konstanta kalorimetru | J/°C |
| m | Hmotnost látky | kg |
| m_1 | hmotnost studené vody | kg |
| m_2 | hmotnost teplé vody | kg |
| m_p | hmotnost pšenice | kg |
| m_v | hmotnost vody | kg |
| m' | hmotnost objemové jednotky nehomogenního materiálu včetně otevřených i uzavřených pórů a dutin. | kg |
| M | vlhkost pšenice | % |
| M_e | intenzita vyzařování tělesa | W/m ² |
| \dot{q} | tepelný tok | W/m ² |
| t | teplota směsi | °C |
| t_1 | teplota studené vody | °C |
| t_2 | teplota teplé vody | °C |
| t_p | teplota pšenice | °C |
| t_v | teplota vody | °C |
| T | termodynamická teplota | K |
| V | Objem látky | m ³ |
| V_{nm} | objem nehomogenního materiálu včetně otevřených i uzavřených pórů a dutin | m ³ |
| V_p | celkový objem částic | m ³ |
| V_{por} | objem porézní přepážky | m ³ |
| V_ε | objem mezer mezi jednotlivými částicemi | m ³ |
| α | tepelná difuzivita | m ² /s |
| ε | mezerovitost | - |
| ε_T | emisivita | - |
| θ_s | sytný úhel | ° |
| λ | tepelná vodivost | W/m·K |
| ρ | hustota | kg/m ³ |
| ρ' | objemová hmotnost | kg/m ³ |
| ρ'_s | sytná hmotnost | kg/m ³ |

Seznam příloh

P1 Data a výpočty sypné hmotnosti, hustoty, mezerovitosti a sypného úhlu v Excelu

P2 Data a výpočty měrné tepelné kapacity v Excelu