

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra botaniky a fyziologie rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv genotypu na hodnoty spalného tepla vybraných druhů
netradičních listových zelenin**

Bakalářská práce

**Veronika Dobrovodská
Zahradnictví**

doc. Ing. František Hnilička, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv genotypu na hodnoty spalného tepla vybraných druhů netradičních listových zelenin" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 26. 4. 2024

Pobrovodská

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Františku Hnilíčkoví, Ph.D. za jeho pomoc, cenné rady a připomínky při vypracování méj bakalářské práce.

Vliv genotypu na hodnoty spalného tepla vybraných druhů netradičních listových zelenin

Souhrn

Bakalářská práce byla zaměřena na studium vlivu genotypu na energetický obsah vybraných druhů asijské listové zeleniny. Pro zjištění energetické hodnoty vybraných vzorků byla použita metoda spalné kalorimetrie. Spálením sušiny jednotlivých rostlin byly získány hodnoty spalného tepla, které byly použity pro srovnání energetické hodnoty sledovaných odrůd. Spalná kalorimetrie je metodou destruktivní, která umožňuje měření tepelné energie uvolněné z organických sloučenin po spálení vzorku. V rámci rostlinné fyziologie se tato metoda využívá pro hodnocení míry fotosyntézy a rostlinného metabolismu, dále pro sledování tvorby, transportu a ukládání asimilátů do různých orgánů a celkové hodnocení růstu a vývoje rostlin, potažmo celého ekosystému.

V pokusu byly zkoumány tři druhy asijské listové zeleniny – pak choi, mizuna a perila. U listové zeleniny pak choi byly vybrány dvě odrůdy, konkrétně zelenolistá 'Atari F1' a červenolistá odrůda 'Baraku F1'. Stejně tomu tak bylo u mizuny, použité odrůdy byly 'Waido' se zeleným zbarvením a 'Red Knight F1' s červenými listy. V případě perily byla hodnocena pouze zelenolistá varianta perily křovité bez konkrétní odrůdy. Asijská listová zelenina byla vybrána z toho důvodu, že se jedná o relativně málo známé druhy listové zeleniny a zvýšením povědomí o těchto druzích je možné přispět k většímu zájmu o konzumaci zdraví prospěšné listové zeleniny. I pro české pěstitele představuje tato zelenina možnost rozšíření nabídky o zajímavé a netradiční druhy, které budou v budoucnu pravděpodobně mezi spotřebiteli nabývat na oblíbenosti.

U vybraných druhů asijské listové zeleniny byla pozornost zaměřena na zjišťování hodnot spalného tepla, které vypovídají o množství energie obsažené v jednotlivých zkoumaných rostlinách. Rostliny byly pěstované ve stejných podmínkách s tím rozdílem, že část byla zasazena do aeroponického systému a část do hydroponického. Nejvyšší průměrná hodnota energetického obsahu byla zjištěna u rostlin perily ($14,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), na druhém místě byla mizuna ($14,0 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a na posledním pak choi ($13,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Rozdílné hodnoty spalného tepla byly naměřeny i mezi zelenolistými a červenolistými odrůdami, nebylo ale zjištěno, že by pouze barva listů byla určujícím znakem pro vyšší energetickou hodnotu. Průměrně bylo vyšší množství energie naměřené u rostlin pěstovaných v aeroponickém prostředí ($14,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) ve srovnání s hydroponickým ($13,7 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). U jednotlivých druhů i odrůd pěstovaných ve stejném prostředí bylo možné pozorovat rozdíly v obsahu energie, z čehož je možné potvrdit hypotézu o vlivu genotypu na energetický obsah odlišných odrůd. Tato metoda se také prokázala vhodnou pro měření efektivity fotosyntézy na základě hodnocení energetického obsahu rostlin.

Klíčová slova: listová zelenina; spalná kalorimetrie; spalné teplo; fotosyntéza; energie

The influence of genotype on the combustion value of selected types of non-traditional leafy vegetables

Summary

The bachelor thesis was focused on the study of the influence of genotype on the energy content of selected types of Asian leafy vegetables. The method of combustion calorimetry was used to determine the energy value of the selected samples by burning the dry matter of individual plants to compare the energy value of the observed varieties. Combustion calorimetry is a destructive method that allows the measurement of thermal energy released from organic compounds after burning a sample. Within plant physiology, this method is used to assess the photosynthetic rate and plant metabolism, as well as to monitor the formation, transport and storage of assimilates in various organs and to assess plant growth and development, eventually to evaluate whole ecosystems.

Three types of Asian leafy vegetables were chosen for the experiment - pak choi, mizuna and perilla. Two varieties of pak choi were used, namely the green-leafed 'Atari F1' and the red-leafed 'Baraku F1'. Green-colored 'Waido' and 'Red Knight F1' with red leaves were used for mizuna. In the case of perilla, only the green-leafed perilla was evaluated without any specific variety. The choice of these plants was made due to them being a relatively unknown type of leafy greens and by making them more well-known, it is possible to increase interest in healthy leafy greens. Even for Czech growers, these vegetables represent the possibility of expanding the offer by choosing interesting and non-traditional species, which will likely gain popularity among consumers in the future.

The attention was focused on determining the combustion value of the plants, which indicates the amount of energy they contain. The plants were grown in the same conditions, with the difference that approximately half of the plants was planted in an aeroponic system and the other in a hydroponic system. The highest average value of energy content was found in perilla plants ($14,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), followed by mizuna ($14,0 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) and lastly in pak choi ($13,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Different calorific values were also measured between green-leafed and red-leafed varieties, but it was not proven that the color of the leaves was a determining factor for a higher energy value. On average, the amount of energy measured was higher in plants grown in the aeroponic environment ($14,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) compared to the hydroponic ($13,7 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Differences in the energy content of individual species and varieties grown in the same environment were observed and it was possible to confirm the hypothesis of the influence of genotype on the energy content of different varieties. This method has also proven to be suitable for measuring the photosynthetic rate based on the evaluation of the energy content of plants.

Keywords: leafy vegetables; combustion calorimetry, combustion heat, photosynthesis, energy

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Cíl práce a hypotézy	8
3	Literární rešerše	9
3.1	Kalorimetrie a její využití.....	9
3.1.1	Historie měření tepla a vývoj kalorimetrie	9
3.1.2	Princip kalorimetrie	11
3.1.3	Využití spalné kalorimetrie v biologii.....	13
3.2	Energie	15
3.2.1	Sluneční energie a fotosyntéza.....	15
3.2.2	Energie v ekosystému	16
3.2.3	Energetická hodnota rostlinné biomasy.....	19
3.2.4	Vliv stresorů na energetický obsah.....	21
3.3	Listová zelenina	23
3.3.1	Součást lidské výživy	24
3.3.2	Nutriční hodnota.....	25
3.3.3	Pěstování netradičních druhů listové zeleniny	26
4	Metodika	27
4.1	Charakteristika rostlinného materiálu.....	27
4.2	Založení pokusu	28
4.3	Stanovení hmotnosti sušiny.....	28
4.4	Stanovení spalného tepla	29
5	Výsledky	30
5.1	Spalné teplo jednotlivých druhů listové zeleniny.....	30
5.1.1	Pak choi.....	30
5.1.2	Mizuna	30
5.1.3	Perila	31
5.2	Vliv listového zbarvení	32
5.3	Vliv pěstování na obsah energie	33
5.4	Srovnání energetické hodnoty	35
6	Diskuse	36
7	Závěr	38
8	Literatura.....	40

1 Úvod

Kalorimetrie je jednou z experimentálních metod termické analýzy, která se zaměřuje na hodnocení toku energie v širokém spektru vědních odvětví. První kalorimetr sestavený v 18. století prošel velkou řadou změn a postupným vylepšováním kalorimetrických přístrojů se také rozšiřuje možnost jejich využití. Mezi obory uplatňující výsledky kalorimetrického měření patří například chemické či biologické odvětví, dále materiálové inženýrství, farmacie, potravinářství a další.

Spalná kalorimetrie je metodou destruktivní, která hodnotí energetický obsah vzorků jejich spálením a měřením tepla uvolněného během této reakce. S použitím této metody je možné hodnotit jednoduché sloučeniny i složitější materiály. V biologickém odvětví se spalná kalorimetrie používá pro studium rostlin, živočichů i celých ekosystémů.

V rámci rostlinné fyziologie je hodnota naměřeného spalného tepla užitečná pro sledování míry tvorby asimilátů a jejich transportu a ukládání v rostlinných orgánech. Tímto způsobem je možné hodnotit míru fotosyntézy a rostlinný metabolismus, růst a vývoj rostlin v průběhu času a také působení stresových faktorů na tyto procesy.

Hodnocením vybraného rostlinného materiálu pomocí spalné kalorimetrie je možné porovnat energetickou hodnotu jednotlivých vzorků a zjistit rozdíly mezi nimi. Na biochemické složení rostlin má vliv mnoho faktorů. Nejvýznamnějšími z nich jsou genotyp dané rostliny a prostředí, ve kterém zkoumaný jedinec roste. Spalná kalorimetrie je jednoduchou a ekonomicky nenáročnou metodou, pomocí které je možné hodnotit odlišné odrůdy a porovnat jejich energetický obsah. Tato hodnota je ovlivněna také abiotickými faktory prostředí, které by v případě poskytnutí optimálních pěstebních podmínek měly mít pozitivní vliv na míru asimilace. Získané informace lze použít za účelem popisu vlastností jednotlivých odrůd, pro vyhodnocení jejich energetického přínosu a také pro doporučení vhodných pěstebních podmínek, které zefektivní růst a vývoj daných odrůd.

2 Cíl práce a hypotézy

Tvorba asimilátů a jejich transport v rámci jednotlivých rostlinných orgánů lze sledovat řadou metod. Jednou z metod, kterou lze studovat vztah source-sink je metoda spalné kalorimetrie. Tato metoda byla vybrána, jelikož umožňuje vyhodnocovat energetický obsah zkoumaných rostlinných vzorků, který přímo souvisí s fotosyntézou a procesem asimilace.

Hypotézy práce

1. Existuje mezidruhový rozdíl v obsahu energie u jednotlivých druhů listové zeleniny
2. Uvedená metoda je vhodná pro hodnocení fotosyntetické výkonnosti rostlin.

Cíl práce

1. Studium vlivu genotypu na hodnoty spalného tepla rostlin.

Netradiční druhy asijské listové zeleniny byly pro pokus zvoleny proto, že se jedná o relativně málo známý typ zeleniny jak mezi konzumenty, tak mezi českými pěstiteli. Studia zaměřená na přínos této zeleniny by do budoucna mohla zvýšit povědomí o jejich existenci a přispět tak k celkovému zvýšení konzumace zeleniny.

3 Literární rešerše

3.1 Kalorimetrie a její využití

Kalorimetrie jako součást termické analýzy dnes nachází využití v mnohých odvětvích přírodních věd. S postupným vývojem technologií bylo umožněno zpřesnit výsledky měření tepla produkovaného či spotřebovaného během fyzikálních a chemických reakcí (Sarge et al. 2014).

Podle Hniličky et al. (2010) je kalorimetrie velmi univerzální metodou, která je používána pro hodnocení energetického toku například v oblastech chemie, biologie, biochemie, metalurgie či materiálového inženýrství. Postupem času došlo k vývoji velkého množství kalorimetrických přístrojů a jejich průběžným zdokonalováním neustále narůstají možnosti využití tohoto typu měření.

Kalorimetrie je relativně snadnou a ekonomicky nenáročnou metodou, která se využívá za účelem měření změny tepelné energie sledovaného vzorku během chemických reakcí či fyzikálních změn. Na základě zákona o zachování energie je hodnocena energie, která během reakcí nemůže být vytvořena či zničena, ale pouze mění svou formu na energii tepelnou, která je kalorimetrem vyhodnocována. Pomocí kalorimetrických přístrojů se uskutečňuje reakce a tepelná změna v izolovaném prostředí, a díky tomu je možné tento proces zaznamenat a změřit (Sarge et al. 2014).

Kromě hodnocení aktuálního energetického obsahu zkoumaného vzorku je s použitím různých typů kalorimetrů také možné určit tepelnou kapacitu látky a vyhodnotit tak její tepelné vlastnosti. Dalším použitím je sledování mechanismu chemických reakcí za účelem optimalizace podmínek, ve kterých reakce probíhají (Perisanu et al. 2024).

Pro co nejefektivnější výsledky kalorimetrického měření je nutné dodržovat několik zásad. Kalorimetrické přístroje musí být správně kalibrovány pro kvalitní hodnocení vzorku a je potřeba zajistit dostatečnou izolaci, pomocí které se předchází významným tepelným ztrátám. Pro vyhodnocování je také vhodné mít co nejvíce informací o testovaných vzorcích (Sarge et al. 2014).

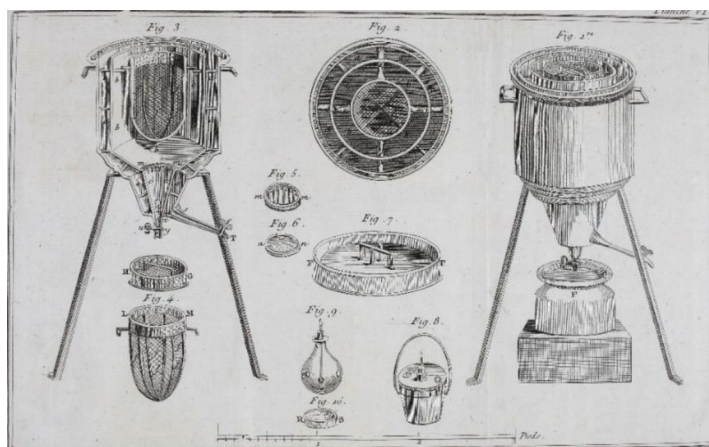
3.1.1 Historie měření tepla a vývoj kalorimetrie

Kalorimetrické měření je dnes nedílnou součástí moderních metod termické analýzy. Samotnou myšlenkou tepla se ale zabývali filozofové již v době řecko-římské před více než 2500 lety (Mott-Smith 1962).

Aristoteles a Platón zkoumali teplo a jeho význam především ve spojitosti s ohněm. V 17. a 18. století se fyzici a matematici začali zabývat podstatou tepla, jeho přenosem a měřením. Například Isaac Newton popisoval přenos tepla pomocí vibrací částic éteru a Descartes jako zrychlený přenos částic vzduchu způsobený světelným zářením. V té době bylo teplo mnohdy považováno za hmotu ve formě velmi lehkého plynu a později docházelo také k pokusům teplo vytvořit pomocí tření (Meschel 2020).

Značný pokrok v měření tepla nastal v druhé polovině 18. století. Fyzik a chemik Joseph Black přispěl svými experimenty ke zrození termodynamiky. Jeho pozorování bylo zaměřeno především na latentní teplo a měrnou tepelnou kapacitu, zároveň byl také prvním vědcem, který rozlišoval teplo a teplotu (Meschel 2020).

Významný pokrok v kvantitativním experimentování s teplem uskutečnil francouzský chemik Antoine Lavoisier a matematik Pierre Simon De Laplace. V jejich spolupráci vznikl v roce 1789 první kalorimetr. Lavoisier ho použil na pokus, který se zaměřoval na tání ledu pomocí tepla tvořeného respiračním pokusným zvířetem a porovnával ho s množstvím tepla uvolňovaným během spalování uhlí. Pomocí tohoto experimentu došel k závěru, že i dýchání se řadí mezi spalovací procesy. Teplotní změny byly v následujícím desetiletí zkoumány také Benjaminem Thompsonem, který ze svého pozorování vyvodil, že teplo je formou energie, což byla velmi důležitá myšlenka pro vývoj termodynamiky v následujících letech (Lavoisier & De Laplace 1783). Schéma jednoho z prvních Lavoisierových kalorimetrů je uvedeno na Obrázku 1.



Obrázek 1: Kalorimetr A. Lavoisiera

(www.encyklopedia.pwn.pl/haslo/lavoisier-antoine-laurent;3930934.html)

Další významný posun byl v 19. století, kdy vědec James Prescott Joule experimentoval s přeměnou kinetické energie na tepelnou za účelem ohřátí vody. Opakovanou prací s izolovaným systémem zjistil, že energie může přecházet do různých podob a že teplo je měřitelnou formou energie a jako součást chemických reakcí je možné ho přesně změřit. Jeho velkým přínosem pro termodynamiku bylo poskytnutí přesné hodnoty mechanického ekvivalentu tepla (Meschel 2020). Kalorie je definována jako množství energie potřebné ke zvýšení 1 gramu vody ze 14,5 °C na 15,5 °C (Sarge et al. 2014).

Postupný rozvoj v oblasti termodynamiky vedl také k experimentování se spalnou kalorimetrií, které je možné dohledat již v 18. století, nicméně vytvoření první kalorimetrické bomby je připisováno francouzskému chemikovi Berthelotovi v roce 1885. Ten se zabýval sestavením nového typu kalorimetru fungujícího na principu bomby naplněné kyslíkem pod vysokým tlakem. Jeho kalorimetr byl během následujících desetiletí dále vyvíjen a postupem času se stal spolehlivým nástrojem použitelným nejen pro oxidaci organických a anorganických

materiálů, ale i pro zkoumání reakcí, během kterých probíhá transformace mezi plynem při vysokém tlaku a další kapalnou či pevnou látkou (Lamprecht 1999).

Ve 20. století dále narůstalo množství experimentů uskutečněných ve snaze o rozvoj využitelnosti moderní kalorimetrie v různých vědeckých odvětvích. Japonec Masuo Kawakami sestrojil kalorimetr, který využil na měření teploty při směšování kapalných kovů. Krátce poté byl v Německu vynalezen první adiabatický reakční kalorimetr. Vědci Kubaschewski a Walter byli schopni sestavit přístroj, který fungoval až do teploty 700 °C, a jeho měření bylo na principu použití pelet ze stlačených směsí kovů, které byly vkládány do kalorimetru. V 50. letech přišli Ticknor a Bever s typem kalorimetru umožňujícím měření teplotních změn při vzniku roztoků. Další průlom nastal s Calvetovým kalorimetrem, který zkoumal tepelný tok mezi povrchem vnitřní nádoby mikrokalorimetru a jeho pláštěm. Tento kalorimetr dále rozvíjel americký vědec Kleppa. Ten pomocí vylepšené izolace a použitím různých materiálů zpřesnil výsledky měření a umožnil využívání kalorimetru i při velmi vysoké teplotě (Meschel 2020).

Nejvýznamnější rozdíly mezi prvními kalorimetry a moderními kalorimetry jsou ve využití nových materiálů a vyspělejší technologie. Dnešní rozvoj kalorimetrie a vylepšování kalorimetrických přístrojů se zaměřuje také na měření v extrémních teplotních podmínkách (přes 2000 °C) a rozšíření využití do dalších vědeckých odvětví (Perisanu et al. 2024).

3.1.2 Princip kalorimetrie

Kalorimetrické měření je fyzikální metoda zaměřující se na měření tepla. Tepla není možné měřit přímo, ale pouze ve formě teplotního toku neboli fyzikálního toku energie (Krstić 2022). V minulosti se považovalo teplo a různé druhy energie (elektrická, kinetická atd.) za samostatné a nezávisle fungující formy obsažené v látkách a systémech. Dnes se nejčastěji používá pojem vnitřní energie, která je uložena uvnitř daného systému a během energetické výměny se může projevit ve formě tepelné, kinetické či jiné energie. Tepla uvolňované nebo pohlcované určitým systémem tedy přímo souvisí se změnou vnitřní energie. Pokud dochází k uvolňování tepla například spalováním, znamená to pokles vnitřní energie systému. Změna tepla se projevuje jako tepelný tok, kterým se energie přesouvá. Kalorimetrie se tedy využívá pro měření tohoto tepelného toku, a tudíž i toku energie (Sarge et al. 2014).

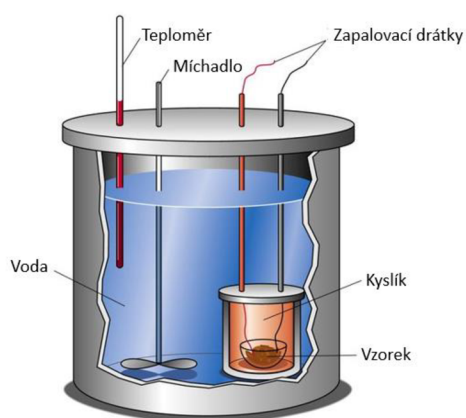
Přeměnu různých forem energie a princip tepelné výměny je možné popsat pomocí zákonů termodynamiky. Tento fyzikální obor se zaměřuje především na popis vlastností tepelných dějů z energetického hlediska neboli na změny teploty a energie systému. První termodynamický zákon uvádí, že na základě zákona o zachování energie je množství všech forem energie v izolovaném systému konstantní. Tato energie tedy může být transformována z jedné formy na jinou, ale nemůže být vytvořena či zničena. Pro zvýšení či snížení vnitřní energie systému je nutné energii dodat, případně odevzdat z okolí. Druhý termodynamický zákon říká, že při styku dvou soustav s odlišnou teplotou nemůže dojít k samovolnému přechodu tepla z chladnější soustavy do teplejší. Při samovolné a nevratné transformaci energie v přírodních systémech dochází ke zvýšení míry neuspořádanosti energie. Třetí termodynamický zákon uvádí, že při teplotě blízké se absolutní nule je entropie neboli míra neuspořádanosti čisté pevné nebo kapalné látky blízko nule (Hari Dass 2013). Nultý

termodynamický zákon, který byl zformován až dlouho po prvních třech, popisuje vztahy mezi termodynamickými systémy. Tento zákon říká, že pokud jsou dva systémy v teplotní rovnováze s třetím systémem, jsou všechny tyto systémy v rovnováze a nedochází mezi nimi k tepelné výměně (Frigerio et al. 1986).

Kalorimetrii je možné popsat jako všestrannou experimentální techniku, která slouží k měření uvolňovaného či pohlcovaného tepla při různých chemických a fyzikálních procesech (Hnilička et al. 2010). K měření tepla byly sestaveny kalorimetry na základě principu měření tepelného toku, podmínek jeho měření a možnostech aplikace. Při pokusech se sleduje uvolňované či spotřebované teplo, které se projevuje změnou teploty systému. Obvykle se jedná o dostatečně izolovanou soustavu za účelem předejití ztráty tepla do okolí a různé kalorimetrické přístroje je možné rozlišovat například na základě rozdílu mezi teplotou systému a teplotou okolí. Dle konkrétního typu kalorimetru je nutné podle způsobu použití během měření systém zahřívát, chladit, či udržovat při konstantní teplotě (Sarge et al. 2014). Mezi často používané typy kalorimetrů patří například adiabatický kalorimetr, isothermní kalorimetr, směšovací kalorimetr či diferenciální skenovací kalorimetr (Hnilička et al. 2010).

Pro správné a přesné vyhodnocení kalorimetrického měření je kromě důkladné izolace systému také důležité zaznamenávání teplotních změn vyvolaných danou reakcí s co největší přesností. Nezbytné je taktéž určení přesné hmotnosti zkoumaného vzorku, který vyvolává pozorovanou teplotní změnu kalorimetru (Sarge et al. 2014).

Velmi důležitou metodou ve fyziologii rostlin je spalná kalorimetrie. Pro stanovení spalného tepla pevných látek se uskuteční spálení vzorku v kalorimetrické bombě pod tlakem kyslíku (Hnilička et al. 2010). Bomba v kalorimetrické nádobě je ponořená ve vodě, které je spálením vzorku předáno uvolněné teplo. Pro výpočet spalného tepla zkoumané látky je nutné znát vodní hodnotu kalorimetru, což je konstanta charakteristická pro daný kalorimetr (Bashyal 2022). Na následujícím obrázku jsou znázorněny základní části spalného kalorimetru.



Obrázek 2: Jednoduché schéma spalného kalorimetru
(upraveno podle www.vedantu.com/chemistry/bomb-calorimeter)

Vývoj v oborech mikroelektroniky a informatiky v posledních desetiletích umožnil rozvoj nových typů kalorimetrů a rozšířil jejich oblast působnosti. Z tohoto důvodu dochází

k nárůstu zájmu o obor kalorimetrie, který poskytuje snadný a účinný způsob zjišťování požadovaných informací. Moderní kalorimetrie se řadí mezi velmi univerzální metody termické analýzy a úspěšně se využívá nejen v přírodních vědách, jako je biologie, medicína či biochemie, ale také ve farmacii či potravinářství pro kontrolu kvality a bezpečnosti potravin nebo například k zjišťování energetického obsahu paliv (Sarge et al. 2014).

Mezi nejpoužívanější kalorimetry dnes patří diferenciální skenovací kalorimetr, který je využíván například pro rozbor různých materiálů či kontrolu kvality léků a potravin (Perisanu et al. 2024). Diferenční skenovací kalorimetrie je metoda fungující na principu měření rozdílu množství dodaného tepla mezi zkoumaným vzorkem a referenčním vzorkem, které je nezbytné pro udržení stejné teploty obou vzorků. Jedná se tedy o měření energie, jejíž hodnota se mění při oteplování a ochlazování vzorku, a zároveň je měřena teplota, při které se množství energie mění. Tato metoda je také vhodná při výrobě polymerů či skla za účelem měření teploty skelného přechodu (Wiedemann & Felder-Casagrande 1998).

Dalším typem jsou roztokové kalorimetry, které jsou přínosem při výzkumu a popisu iontových kapalin nebo hodnocení amorfních a krystalických fází látek (Perisanu et al. 2024). Pro zkoumání vlastností polymerů se dnes využívají čipové kalorimetry, které umožňují měření ve velkém rozsahu teploty a při rychlých teplotních změnách. Mikrobiální obory využívají mikrokolorimetry pro určení množství bakterií a jejich přibližnou identifikaci na základě tepla, které dané bakterie produkují. Toto představuje určitou alternativu klasického vyhodnocování bakteriálních kultur pomocí mikroskopu a předpokládá se rozšíření této metody i v odvětvích medicíny (Sarge et al. 2014). Mikrokolorimetrie se dále využívá například pro hodnocení termální stability potravinových složek (Regele et al. 2023), měření energie záření či při výrobě a testování nových léčiv (Runge & Heger 2000).

3.1.3 Využití spalné kalorimetrie v biologii

Spalná kalorimetrie dnes představuje jednu z nejvyvinutějších metod termické analýzy. Její využití je velmi všestranné především v aplikované fyziologii rostlin, jelikož poskytuje přesné měření toku energie mezi rostlinou a jejím okolím. Pomocí spalné kalorimetrie je možné vyhodnotit vlastnosti zkoumaného rostlinného materiálu a metabolismu rostlin (Hnilička et al. 2015), dále produkci a přesun energie v souvislosti s růstovými charakteristikami rostlin či vliv okolního prostředí na vývoj rostlin (Jia et al. 2018).

Spalná kalorimetrie byla v počátcích využívána především za účelem zjištění termodynamických hodnot, jako je reakční teplo, energetický obsah jednoduchých i složitějších látek či množství uchované energie a energie ztracené při chemických reakcích (Korchagina 1998). S dalším vývojem kalorimetrie, hlavně v biologickém odvětví, začalo být obtížnější popisovat naměřené hodnoty pomocí termodynamických pojmů – analýza energetického obsahu se stala komplexnější se zaměřením na širší pojetí vztahu mezi energií a jejím využitím. Spalná kalorimetrie je dnes také velmi přínosnou metodou pro zjišťování energetického obsahu potravin, a tedy jejich nutriční hodnoty (Lamprecht 1999).

Tento přístup nicméně v určitých případech nemusí poskytovat ty nejpřesnější výsledky. Jako příklad uvádí Lamprecht (1999) měření energetického obsahu rostlin

skládajících se mimo jiné z nestravitelných strukturních karbohydrátů, které nemají žádný energetický přínos pro konzumenta. Celkový obsah energie naměřený v biomase tedy ne vždy odpovídá hodnotě energie dostupné ve stravě. Stejně tak ořechy, které jsou obecně známé jako potravina s vysokým obsahem energie, uchovávají velkou část této energie ve skořápce a činí ji tak pro konzumenta nedostupnou. Podle Battleyho (1995) je kalorimetrie značným přínosem pro měření spalného tepla jednoduchých látek, zejména pro kvantitativní srovnávání jejich tepelného obsahu. Poukazuje ale také na to, že při experimentech s rostlinnou biomasou není vždy možné určit přesné složení spalované látky a z jaké míry se na výsledných hodnotách podílí sušina a z jaké popeloviny, tudíž interpretace těchto měření nemusí být vždy jasná.

Z pohledu hodnocení ekologické energie je spalná kalorimetrie velmi přínosná pro stanovení rychlosti fotosyntézy. Podle Hniličky et al. (2010) se jedná o destruktivní metodu, která umožňuje zjištění změny obsahu energie vyprodukované biomasy na základě hodnoty tepelného skoku. Z této hodnoty je možné stanovit obsah brutto a netto energie v jednotlivých orgánech rostlinného těla.

Spalná kalorimetrie také umožňuje pozorování změn ukládání asimilátů v rostlině a jejich přesun mezi jednotlivými rostlinnými orgány během vývoje dané rostliny. Na základě experimentálních měření se podle Hniličky et al. (2015) prokázal jednoznačný vztah mezi tvorbou rostlinné sušiny a nárůstem obsahu látek bohatých na energii. Spalná kalorimetrie se tedy zabývá i konceptem source – sink neboli zkoumáním rostlinných orgánů na základě toho, jestli jsou rostlinou využívány pro fotosyntetické procesy a tvorbu asimilátu, nebo jestli asimiláty spotřebovávají či uchovávají. Pomocí této metody je dále možné detekovat a pozorovat reakce metabolismu rostlin na stresové faktory. Podle Hansen et al. (2018) je kalorimetrie přínosná vyhodnocováním výkonu rostlin pro šlechtitelské účely. Tato metoda totiž umožňuje srovnání rostlinných odrůd pěstovaných v různém prostředí a hodnotí například vliv salinity, přítomnosti toxinů či nedostatku živin.

Pomocí spalné kalorimetrie je také možné určit rychlost respirace rostlin, zvířat a mikroorganismů nacházejících se v půdě (Jia et al. 2018). Půdní organismy mají nenahraditelnou roli v koloběhu uhlíku, jelikož jsou schopné rozkladem organické hmoty zpřístupňovat uhlík pro další využití, a tedy ho opět vracet do oběhu. V tomto komplexním koloběhu jsou hlavním zdrojem uhlíku v půdě rostlinné zbytky, které jsou zpracovávány půdními rozkladači. Pro stanovení půdních vlastností a metabolické aktivity mikroorganismů se dnes využívá mikrokolorimetrické měření, případně jiné termogravimetrické metody (Hnilička et al. 2020).

Spalná kalorimetrie tedy našla využití v odvětví biologie a ekologie například hodnocením energetického obsahu plodin, reakce rostlin k abiotickému stresu nebo i z důvodu ekonomického přínosu pro schopnost určit energetický obsah paliv. Jelikož se energie z paliv získává jejich spalováním, je možné využít kalorimetrické měření pro zjištění energetického obsahu daného paliva a určení jeho ceny (Lamprecht 1999).

3.2 Energie

3.2.1 Sluneční energie a fotosyntéza

Hlavním vstupem energie do ekosystému je sluneční záření. Tato forma energie je pomocí fotosyntézy přeměňována na energii chemickou, kterou rostliny využívají pro tvorbu biomasy (Reichle 2019). Další energetické toky vstupující do ekosystému pocházejí z nitra Země, činnosti člověka a dýchání živých organismů. Ve srovnání s energií slunečních fotonů se ovšem jedná pouze o velmi malou část celkového energetického vstupu. Ztráta energie rostlinného organismu naopak vzniká například výdejem energie do prostoru v podobě tepelného záření, během respirace rostlin či při zvyšování okolní teploty ohřevným teplem (Hnilička et al. 2010).

Z celkového množství slunečního záření dopadajícího na povrch Země se pouze necelých 50 % nachází ve vlnových délkách od 400 do 700 nm (Hák et al. 2020). Tato část vlnového spektra se nazývá fotosynteticky aktivní radiace (FAR) a je využívána rostlinami při procesu fotosyntézy. Ve vegetačním období rostliny zachycují pouze malou část této radiace. Pro maximální efektivitu fotosyntézy by se absorpce FAR měla pohybovat v rozmezí 25 až 45 %. Ve skutečnosti většina rostlin váže pouze jednotky procent (polní plodiny, lesy), v některých případech dokonce desetiny či setiny procenta (pouštní, polopouštní a stepní rostliny) (Hnilička et al. 2010). Na množství absorbovaného záření a celkové efektivitě fotosyntézy má zároveň vliv i vnější prostředí, které může být do určité míry ovlivňováno činností člověka. Jedná se například o poskytování potřebného množství závlahy či vyvážený přísun živin (White et al. 2016). Z pohledu pěstování polních plodin, které mají poměrně krátkou vegetační dobu a potřebují sluneční záření využít co nejefektivněji, je vhodné pro maximalizování absorpce sluneční energie zajistit co nejlepší využití stanovištních podmínek a optimalizaci skladby plodin (Hnilička et al. 2010).

Rostliny fotosynteticky aktivní záření využívají k tvorbě uhlíkových sloučenin, jejichž vznik je umožněn přísunem světelné energie, která pohání syntézu sacharidů z oxidu uhličitého a vody za uvolňování kyslíku. Hlavním rostlinným orgánem podílejícím se na fotosyntéze jsou listy, které během světelné fáze fotosyntézy zachycují sluneční energii pomocí chloroplastů. Tato energie je poté spotřebována na přeměnu jednoduché anorganické sloučeniny, oxidu uhličitého, na složitější cukry. Atomy uhlíku i energie tvořící jeho vazby jsou nezbytné pro fungování živých organismů (Reichle 2019). Asimiláty jsou součástí buněčných struktur a zajišťují různé fyziologické pochody. Energie, která je uložena ve vzniklých molekulách, je dále spotřebována při buněčných procesech a zároveň slouží jako zdroj energie pro další formy života (Reichle 2019).

Asimiláty získané při fotosyntéze, někdy také nazývané fotosyntáty, jsou procesem alokace uhlíku dočasně uloženy v asimilujících orgánech převážně ve formě sacharózy a škrobu. Část asimilovaného uhlíku je zadržena v listech za účelem zajištění metabolických procesů a dalšího listového růstu, ale většina asimilátů je exportována do orgánů a pletiv, ve kterých fotosyntéza neprobíhá. V těchto místech jsou asimiláty buď rovnou využity během metabolických procesů, nebo dochází k jejich uložení pro pozdější využití. Tato translokace

asimilátů probíhá pomocí vodivých pletiv, konkrétně floému, kudy se přesouvají do potřebných rostlinných orgánů, čímž dochází k efektivnímu přerozdělování a distribuci uhlíku v rámci celé rostliny (White et al. 2016). Vhodná bilance mezi produkcí a spotřebou uhlíku v rámci rostlinného organismu může mít vliv například na množství a kvalitu vytvořených plodů či na velikost kořenového systému (Sonnewald & Fernie 2018).

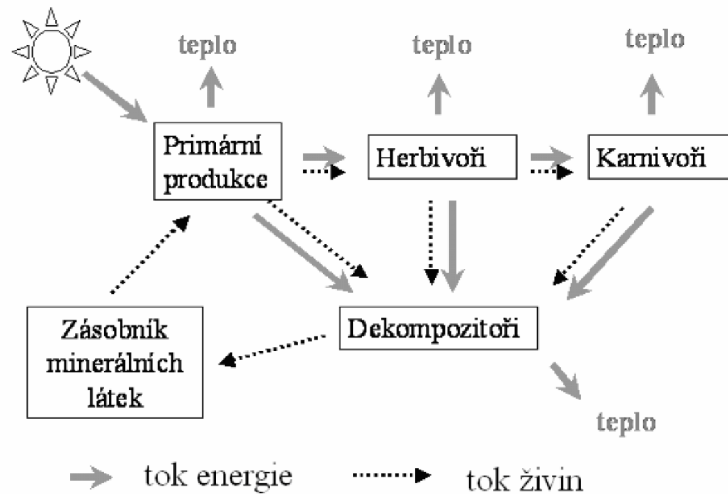
Fotosyntetizující organismy jsou součástí různých ekosystémů a musí neustále reagovat na změny v jejich okolí. Vliv prostředí na průběh fotosyntézy je důležitým tématem pro rostlinné fyziology, ale také pro agronomy, kteří se zabírají především polními plodinami. Mezi zásadní faktory ovlivňující fotosyntézu patří dostupnost světla a vody, koncentrace oxidu uhličitého a okolní teplota. Z pohledu rostlinné produkce jsou tyto údaje důležité proto, že přímo ovlivňují množství a kvalitu výnosu, z čehož plyne zájem o zajištění zvýšení efektivity rostlinné fotosyntézy (Reichle 2009).

Výzkum a porozumění transportu energie v rostlinách a v ekosystémech jsou tedy nezbytné pro potřeby zvýšení výkonnosti zemědělské produkce. Výnos mnohých pěstovaných plodin zřídka kdy dosahuje maximální potenciální hodnoty z důvodu různých biotických i abiotických faktorů ovlivňujících rostlinný růst (Smith et al. 2018). S nárůstem populace přibývá i nutnost zajištění dostatečného množství potravy, k čemuž je užitečné pochopení rostlinného vývoje z hlediska toku energie. Postupné narůstání oxidu uhličitého v atmosféře zvyšuje zájem o zkoumání možností zajišťujících vyšší energetický zisk na základě efektivnější fixace oxidu uhličitého (White et al. 2016). Výzkumy se také zaměřují na energetický tok v rostlinách z důvodu hledání vhodných rostlinných druhů, které ve své biomase ukládají velké množství energie a které by mohly sloužit jako alternativa k fosilním palivům (McKendry 2002).

3.2.2 Energie v ekosystému

Mezi důležité formy energie, které jsou nezbytné pro fungování živých organismů, patří energie mechanická, chemická, tepelná a energie záření. Solární radiace poskytuje v ekosystému dvě z těchto důležitých forem – tepelnou energii, která je zodpovědná za udržování koloběhu vody a ohřev země a atmosféry. Druhou formou je již zmíněná energie fotochemická, která je absorbována fotosyntetizujícími organismy a přeměňována na energii chemickou, čímž se stává přístupnou i pro další články ekosystému (Misra 2005).

Ekosystém je podle Hniličky et al. (2010) dynamický cirkulační systém skládající se z producentů energie, konzumentů, rozkladačů a abiotického prostředí. Tento systém je propojen tokem energie, která do ekosystému vstupuje, je zde transformována a opět z něj vystupuje. Tento koloběh energie z velké míry závisí na primárních producentech energie, kteří transformují energii slunečního záření a zajišťují tak její dostupnost pro další organismy. Na následujícím obrázku je znázorněno jednoduché schéma energetického toku v ekosystému.



Obrázek 3: Tok energie v ekosystému
(Hnilička et al. 2010)

Zkoumání toku energie v ekosystémech je nezbytné pro pochopení energetického vztahu mezi členy ekosystému a energetických změn v rámci jednotlivých organismů. Pomocí energetického toku je možné analyzovat zdroje a ztráty energie a ovlivnit výstup energie z ekosystému. Tok energie je ovlivňován například množstvím vstupující energie a efektivitou primární produkce, strukturou ekosystému a počtem trofických stupňů či řízenými výstupy energie. Důležitým výstupem, který výrazně ovlivňuje množství energie ponechané a odebrané v ekosystému, je sklizeň rostlinné biomasy a jakým způsobem bude dále využita. Obzvláště v agroekosystémech se tímto způsobem mnohdy odebírá značná část energie, a proto je nutné tuto hodnotu sledovat, aby nedocházelo k přílišnému narušování rovnováhy energetického toku v systému (Misra 2005).

Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje bilanci energie v ekosystému, je poměr mezi fotosyntézou neboli vstupem energie, a respirací, kterou se energie z ekosystému vytrácí. Poměr mezi těmito dvěma procesy je v rámci ekosystému velmi variabilní. V populacích složených převážně z velkých organismů, jako jsou lidé, stromy či komunity v klimaxovém stádiu, je značné množství energie uvolňováno respirací. Naopak u aktivních populací malých organismů, jako jsou bakterie nebo řasy, je z hlediska energetického toku vyšší procento energie vyprodukované (Odum 1968). Poměr mezi fotosyntézou a respirací je možné popsat jako rozdíl mezi čistou a hrubou produktivitou primárních producentů. Veškerá energie tvořená fotosyntetizujícími organismy je označována jako hrubá produkce, od které je možné odvodit množství čisté produkce odečtením energie, která je primárními producenty spotřebována v rámci vlastního metabolismu, tedy respirací (Liao et al. 2023).

Na základě termodynamických zákonů by energie, která vstupuje, vystupuje a je uložena v ekosystému, měla být v rovnováze. Tato energie nemůže být zničena, ale pouze transformována na jinou formu. Transformace či přesun energie nikdy není stoprocentně efektivní a část energie se během těchto procesů stává nepřístupnou a uniká ve formě tepla (Misra 2015).

Ekosystémy, které jsou z energetického hlediska otevřenými systémy, jsou závislé na přísunu vnější energie. Primární produkce ekosystému je ovlivňována především množstvím dostupného slunečního záření, oxidu uhličitého, vody, živin a rychlostí a účinností fotosyntézy. Pouze zhruba 0,1 % sluneční energie vstupuje do procesu primární produkce biomasy a je dále dostupné pro sekundární produkci – ta je vždy o jeden řád nižší než produkce primární a je zajišťována produkcí biomasy heterotrofních organismů (Hnilička et al. 2010).

Veškerá energie, která vstupuje do biomasy ovšem nemusí být dále transformována. Příkladem je potrava, která je u některých živočichů strávena jen z části a zbytek prochází organismem bez toho, aby prošel metabolickými procesy. Jedná se také například o světelné záření, které není fixováno chloroplasty a vegetací pouze prochází (Odum 1968).

Podle Hniličky et al. (2010) je zjišťování množství biomasy primární rostlinné produkce a jejího energetického obsahu jedním ze způsobů kvantitativního popisu vegetace. Dále je možné na základě těchto informací analyzovat funkci a strukturu ekosystémů a vyhodnotit produkční schopnost různých společenstev.

Pro porozumění toku energie jednotlivých populací je důležité znát energetický obsah jedinců v daném ekosystému. Za účelem zjištění těchto hodnot je možné využít spalnou kalorimetrii a s pomocí této metody vyhodnotit přibližnou energetickou hodnotu jedinců v ekosystému. Cílem tohoto pozorování je vybrat vhodné vzorky v takovém množství, které by odráželo variabilitu celé populace. Tato měření jsou ovšem velmi složitá, jelikož se množství energie ve zkoumaných jedincích mění s postupem času a také v průběhu celého roku, což je při analýze také nutné brát v potaz (Golley 1961).

Vedle přirozených ekosystémů je dále možné hodnotit tok energie v agroekosystémech. Jedná se o uměle vytvořené ekosystémy, do jejichž chodu více či méně zasahuje člověk. Agroekosystémy jsou vytvořeny v souvislosti se zemědělskou činností za účelem rostlinné či živočišné výroby. Primárním producentem jsou opět rostliny, ale energie do systému vstupuje i v dodatkové formě dle potřeby a za účelem zvýšení efektivity produkce. Část vytvořené energie je z agroekosystému odebírána v podobě sklizené biomasy, část se nevratně ztrácí v podobě tepla a část se vrací či zůstává ve výrobním procesu ve formě energie akumulované v půdě. Využitím spalné kalorimetrie pro hodnocení agroekosystémů je možné lépe pochopit tok energie za účelem zefektivnění rostlinné produkce. Vedle té je dalším článkem v agroekosystémech živočišná výroba, která přijímá energii rostlinné biomasy ve formě krmiv a transformuje ji na koncentrovanější energii ukládanou v živočišných produktech. I část této energie se vrací zpět do půdy jako živočišný odpad, který je rozkládán půdními organismy a opět zpřístupňován pro primární producenty (Hnilička et al. 2010).

Kromě toku energie jsou v ekosystémech i další významné cykly, konkrétně koloběh vody a živin. Voda je nezbytnou složkou pro správný průběh fotosyntézy a dále také umožňuje přesun látek v půdě. Pro cyklus vody je důležitá i sluneční energie, která udržuje koloběh v pohybu odpařováním vody a umožňuje tak její další přesun zpět k primárním producentům. Koloběh živin je taktéž závislý na fotosyntetizujících organismech, které přijímají anorganické látky z prostředí a zabudovávají je do své biomasy. Živiny jsou dále přesouvány potravinovým

řetězcem, a nakonec se navracejí do půdy, ze které jsou díky práci rozkladačů opět zpřístupňované rostlinám (Reichle 2019).

3.2.3 Energetická hodnota rostlinné biomasy

Podle Lamprechta (1999) je rostlinná sušina tvořena přibližně z 95 % organickými sloučeninami, které mají ve svých vazbách uloženou chemickou energii transformovanou z energie slunečního záření. Tento proces je základem pro tvorbu rostlinné biomasy. Zbýlých 5 % tvoří popeloviny neboli anorganické minerální sloučeniny. Poměr mezi těmito dvěma hodnotami je pouze orientační, neboť se dle autora liší podle rostlinného druhu, typu pletiva či prostředí, ve kterém se daná rostlina vyskytuje. Stejně tak se tedy mění i energetický obsah rostlin, a to i v průběhu roku či v závislosti na dalších faktorech vnějšího prostředí.

Energie ukládaná a akumulovaná v organických sloučeninách vyjadřuje energetický obsah rostliny, který může být popsán také jako kalorická hodnota biomasy. Energie se z biomasy vytrácí v podobě tepla během oxidace, ale ztracený oxid uhličitý může být opět asimilován pomocí fotosyntézy (Eriksson et al. 2010).

Velmi důležitým faktorem, který odráží efektivitu energetického toku v rostlině, je rozdíl mezi mírou fotosyntézy a respirace. Pokud je rozdíl mezi těmito procesy nulový, rostlina je z energetického hlediska v rovnováze. V případě, že převažuje míra fotosyntézy a energetický zisk, narůstá množství biomasy a rostlina se vyvíjí. V opačném případě, kdy převažuje míra respirace, rostlinná hmota je spotřebovávána a dochází tak k její degradaci. Tyto zásady jsou platné nejen pro vývoj rostlinné biomasy, ale také pro celý ekosystém (Hnilička et al. 2015).

Vztah mezi fotosyntetickou asimilací a rostlinným růstem je možné popsat jako vazbu dvou na sobě závislých procesů. Fotosyntéza rostlině poskytuje dostatek energie a asimilátů nutných pro vývoj a růst rostlinných orgánů. Aktivní růst rostlinného organismu, zejména přibývání listové plochy, na oplátku umožňuje zvýšení míry fotosyntézy a efektivní využití a přesun vytvořených asimilátů za účelem vývoje nejen vegetativních, ale i generativních orgánů (Luxmoore 1991).

Orgán či rostlinné pletivo, které více asimilátů produkuje, než využívá ke svému vlastnímu metabolismu a růstu, se označuje jako source. Příkladem jsou především dospělé listy a další aktivně fotosyntetizující pletiva, která slouží jako producent či exportér asimilátů. Na opačné straně je sink neboli ta rostlinná část, do které se asimiláty importují a jsou zde spotřebovávány. Jedná se například o kořeny, stonek či vyvíjející se plody. Tyto rostlinné orgány poté využívají poskytnuté asimiláty za účelem respirace či budování buněčných struktur, nebo je mohou uschovat pro pozdější využití ve formě škrobu či jiných karbohydrátů (Rosado-Souza et al. 2023).

Rostlinné orgány mohou během svého vývoje měnit svoji funkci producenta či spotřebitele asimilátů. Nejlepším příkladem tohoto jevu jsou listy – v prvotní fázi svého vývoje získávají asimiláty od starších listů za účelem podpory aktivního metabolismu a rychlého růstu. Jakmile list dosáhne dostatečné velikosti, jeho růst se zpomalí a potřebné množství asimilátů

se sníží. List je poté schopen tvořit dostatek asimilátů i pro ostatní rostlinné orgány, které jsou pomocí floému exportovány na požadovaná místa (White et al. 2016).

Použití spalné kalorimetrie v průběhu změn v růstu rostlin je přínosem pro pochopení transportu, akumulace a využití asimilátů v rostlinné biomase s ohledem na sink a source. Cílem kalorimetrického měření je například analýza změn metabolické aktivity či rozdílů v akumulaci oxidu uhličitého (Hnilička et al. 2020). Během ontogenetického vývoje totiž dochází k přesunu asimilátů a energie v rámci různých rostlinných orgánů, které je možné samostatně hodnotit v požadované růstové fázi (Abrahamson & Caswell 1982).

Energetická hodnota rostlin se výrazně liší v závislosti na přítomnosti vody. Obsah energie uložené v 1 g čerstvé biomasy je $8,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ (Golley 1961), zatímco 1 g sušiny obsahuje přibližně $16,7 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ energie (Paine 1971). Pro hodnocení rozdílů mezi jednotlivými orgány či rostlinnými druhy je vhodné použít naměřené hodnoty jak hrubé energie (brutto), tak i čisté (netto). Hrubá energie v sobě na rozdíl od čisté zahrnuje také energetickou hodnotu popelovin, která je v různých částech rostliny proměnlivá a je ovlivňována například znečištěním prostředí, ve kterém byla rostlina pěstována (Hnilička et al. 2020).

Obsah energie v rostlinách se také odlišuje na základě množství a typu sloučenin, které tvoří rostlinný organismus. Mezi látky s relativně vysokou energetickou hodnotou patří uhlovodíky ($17,2 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), lignin ($26,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), bílkoviny ($23,6 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a tuky ($39,6 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). O něco nižší hodnotu mají škroby ($17,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), glukóza ($15,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a sacharóza ($16,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) (Leith 1975).

Jednotlivé rostlinné orgány obsahují rozdílný poměr těchto a dalších sloučenin, proto je možné zkoumat energetickou hodnotu rostlinných částí v různém období vývoje a vyhodnotit tak transport energie v rámci celého organismu. Podobné množství energie se obvykle nachází v asimilujících orgánech, tedy v listech a stonku, které mají obdobné složení. Ve srovnání s vegetativními orgány bývá vyšší množství energie koncentrované v orgánech generativních, které v sobě mají uložené dusíkaté látky a mastné kyseliny, což jsou sloučeniny bohaté na energii, které jsou obvykle transportovány právě do reprodukčních orgánů. Rozdílné složení rostlinných orgánů ovlivňuje také hodnoty spalného tepla, které odráží energetický obsah jednotlivých orgánů. Například okopaniny, které v sobě ukládají cukry a škrob, mají relativně nízkou hodnotu spalného tepla ($16,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) ve srovnání s průměrnou hodnotou semen olejnin ($25,6 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) (Hnilička et al. 2010).

Kromě chemického složení biomasy ovlivňuje její energetickou hodnotu také genotyp, jelikož i v rámci jednoho rodu se obvykle hodnota spalného tepla liší. Dalšími faktory působící na energetický obsah jsou také vlastnosti pěstebního prostředí, jako je půdní typ a množství dostupných živin či intenzita a množství sluneční radiace, která ovlivňuje míru fotosyntézy (Hnilička et al. 2020).

Pro zajištění vyššího a kvalitnějšího rostlinného výnosu se této problematice věnuje také obor šlechtitelství, který se zabývá možnostmi využití transgenózy za účelem úpravy činnosti enzymů či proteinů, které ovlivňují produkci a spotřebu asimilátů. Řízený transport látek umožňuje přesun většího množství energie do těch částí rostlinné biomasy, které jsou určené pro sklizeň v rámci zemědělské produkce (Sonnewald & Fernie 2018).

3.2.4 Vliv stresorů na energetický obsah

Spalná kalorimetrie je také vhodnou metodou pro měření změn v rostlinném metabolismu a odolnosti rostlin a ekosystémů v reakci na stresové podmínky (Hnilička et al. 2015).

V přirozených ekosystémech i v člověkem řízených agroekosystémech se rostliny neustále vyrovnávají se změnami ve svém okolí. Stresor je v tomto kontextu možné definovat jako vnější faktor, který má na rostlinu nepříznivý vliv. Některé environmentální faktory, jako je změna teploty, mohou v rostlinách vyvolat stresovou reakci během několika minut, nevyhovující obsah vody v půdě ovlivní rostlinu v řádu dní či týdnů a faktory, jako je nedostatečný přísun živin, mohou rostlinu negativně ovlivnit až po několika měsících (Ashraf & Harris 2013). Abiotický stres, který vzniká z nevyhovujících klimatických či půdních podmínek, má také negativní vliv na množství a kvalitu výnosu zemědělské produkce. Ztrátu výnosu z důvodu neoptimálních abiotických podmínek je možné hodnotit ve vztahu k potenciálnímu výnosu na základě genetických předpokladů použitých odrůd (Boyer 1982).

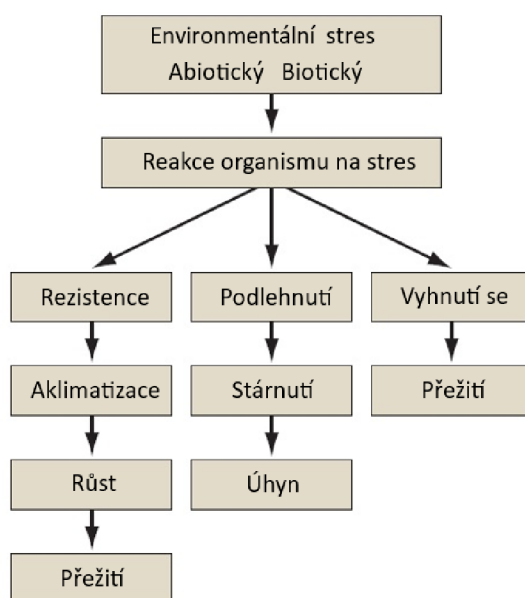
Míru a intenzitu stresu je možné sledovat v souvislosti s životaschopností rostlin, produkčním výnosem, mírou akumulace biomasy nebo například hodnotou primární produkce či množstvím přijímaného oxidu uhličitého a živin, což přímo souvisí s celkovým růstem rostlin. Měření rostlinného stresu se obvykle uskutečňuje metodou komparace. Během experimentálního pěstování se porovnává fyziologický stav rostliny pod vlivem vybraného stresoru a rostliny kontrolní, která je pěstována v optimálních podmínkách (White et al. 2016).

Mezi časté reakce rostlinného organismu na stres patří zhoršený růst a vývoj vegetativních i generativních orgánů či snížení míry fotosyntézy. Tyto reakce jsou na sobě přímo závislé, neboť nedostatečná tvorba asimilátů působí mimo jiné na rostlinný růst a velikost listové plochy a na proces kvetení a tvorby plodů. Stresové faktory také snižují odolnost rostlin vůči chorobám a škůdcům, narušují metabolické procesy a mohou způsobit oxidační poškození buněk. V případě, že dochází k pouze mírnému a krátkodobému působení stresoru, může být rostlinné poškození zanedbatelné a po odstranění negativního vlivu je rostlina schopna plného zotavení. Pokud je působení nepříznivých vlivů příliš intenzivní či dlouhodobé, může dojít k omezení kvetení a tvorby semen, urychlení stárnutí a v některých případech k úhynu rostliny (Granier et al. 2007).

Reakce rostlin na stresové faktory úzce souvisí se schopností rostliny vyrovnávat se s nepříznivými vlivy. Organismy s dobrou tolerancí k biotickým či abiotickým stresorům lépe reagují na změny v prostředí a do určité míry je dokážou překonat bez větších problémů. Tato schopnost také ovlivňuje celkovou míru resistance rostlinných odrůd, což je dnes velmi cenná a důležitá vlastnost, která pozitivně ovlivňuje výnos v rámci zemědělské produkce. Různé typy stresu také obvykle nepůsobí stejným způsobem na všechny organismy. Příkladem je hrách a sója – plodiny, pro které se optimální teplotní podmínky pohybují kolem 20–30 °C. V případě zvýšení teploty nad tuto hranici se negativní reakce jako první projeví u hrachu, který začne vadnout rychleji. Sóju je tedy možné popsat jako plodinu s lepší tolerancí k teplotnímu stresu (Taiz & Zeiger 2002).

Opakované působení konkrétních stresových faktorů může zároveň pozitivně působit na míru tolerance, jelikož rostlina prochází procesem aklimatizace a je schopna lépe reagovat na nepříznivé vlivy. V případě rezistence související s konkrétním genotypem se používá pojem adaptabilita, která je opět velmi cennou vlastností obzvláště při potřebě pěstování rostlin v méně výhodných pěstebních podmínkách (Ncama et al. 2022).

Některé rostliny jsou i přes přítomnost stresových vlivů schopné vyhnout se negativnímu dopadu na fyziologické procesy. Například tolíce vojtěška reaguje na nedostatek vody ve svém okolí tvorbou velmi dlouhých kořenů, které pro rostlinu získávají dostatek vláhy z podzemní vody. To jí umožňuje přežít v místech, kde ostatní rostliny s mělkým kořenovým systémem v případě delšího období sucha uhynou. Dalšími reakcemi, které rostlině umožňují překonat působení stresoru, jsou například tvorba dužnatých listů, zesílení kutikuly či pokrytí listů trichomy (Hopkins & Hüner 2009). Uvedené reakce rostlin na stresory je možné pozorovat na následujícím schématu.



Obrázek 4: Efekt environmentálního stresu na přežití rostlin
(upraveno podle Hopkins & Hüner 2009)

Stresory je možné rozdělit na biotické a abiotické. V přirozeném prostředí na rostlinu obvykle nepůsobí pouze jeden nepříznivý faktor, ale jedná se o kombinaci vlivů, která vytváří celkovou zátěž na rostlinný organismus. V případě biotických stresorů jsou to mikroorganismy, houby, bakterie, viry, živočichové či rostliny, které napadnou danou rostlinu a interagují s ní, přičemž dochází ke vzájemnému ovlivňování jejich metabolismů. Obsah energie napadeného organismu je obvykle vyšší než v případě zdravého jedince. Zvýšení hodnot spalného tepla může být způsobeno například reakcí rostlinného organismu v podobě změny transportu uhlíku mezi poškozeným a zdravým pletivem nebo zvýšenou tvorbou meziproductů či

sekundárních metabolitů s vysokou energetickou hodnotou. Mezi další biotické stresory se řadí plevele a rostliny zaplevelující, které konkurují kulturním rostlinám. V tomto případě se jedná o faktor, který naopak způsobuje snížení obsahu energie v rostlinné biomase (Hnilička et al. 2010).

I působení abiotického stresu má ve většině případů za následek snížení energetické hodnoty. Mezi nejvýznamnější abiotické stresory patří neoptimální množství dostupné vody. To může být způsobeno nadměrným množstvím vody v půdě, což vede k nedostatečnému přísunu kyslíku ke kořenovému systému rostliny a ovlivnění míry respirace (Ncama et al. 2022). Opačným, ale zásadním vlivem, je nedostatek vody neboli vodní deficit. V případě sucha dochází k poklesu obsahu energeticky bohatých látek, a to zejména v kořenovém systému. Tento efekt je o to významnější například u zeleniny a dalších rostlin, které mají vysoké nároky na vodu. Kromě kořenů je ovlivněna i nadzemní část rostliny, jelikož dochází ke snížení míry fotosyntézy a tvorbě asimilátů, což má za následek nižší energetickou hodnotu v rámci celé rostlinné biomasy (Hnilička et al. 2010).

3.3 Listová zelenina

Zelenina má nezastupitelnou roli jak v zahradnické činnosti, tak ve výživě člověka. Zelinářství patří v České republice mezi tradiční součást zemědělské produkce a mnohé odrůdy zde vypěstované jsou kvalitativně na srovnatelné úrovni s odrůdami ze zahraničí. V ekonomickém systému mezinárodního obchodu je do Česka importováno velké množství zeleninových druhů s nižšími prodejními cenami, což pro mnohé domácí pěstitele představuje vážnou konkurenci. Pro české pěstitele je tedy nezbytné zaměřovat se na kultivaci kvalitních druhů se zajímavými vlastnostmi pro spotřebitele. Konzumenti se často zaměřují například na vizuální a chuťovou stránku, ale také na nutriční hodnotu a celkový výživový přínos zeleniny (Petříková et al. 2006).

Pro pěstitele patří mezi základní ukazatele úspěchu množství a stabilita výnosu, výtěžnost a efektivní odbyt. S narůstajícím rozšiřováním druhové a odrůdové skladby je nutné vybírat vhodné odrůdy za účelem vytvoření efektivního a výnosového pěstitelského procesu a uspokojení současných potřeb konzumentů. Pěstitelé se také mohou zaměřovat na méně známé odrůdy a zvýšit tím svou konkurenceschopnost na trhu (Bartoš et al. 2000).

Listová zelenina představuje pouze malou část z celkového množství konzumované zeleniny. Z výživového hlediska je ale velmi zajímavým druhem, který nabízí spotřebitelům široké spektrum živin. Do budoucna se jedná o velmi perspektivní typ zeleniny, který poskytuje výhody v podobě zlepšení přísunu mikroživin, vyrovnání nezdravých stravovacích návyků a nabízí také posun k udržitelnému zemědělství v podobě nových pěstebních technologií (Kennedy 2011).

3.3.1 Součást lidské výživy

Podle Světové zdravotnické organizace se doporučené množství konzumované zeleniny a ovoce pohybuje kolem 400-600 g na osobu na den. Ve skutečnosti ale medián průměrné konzumace dosahuje pouhých 223 g a skoro 80 % světové populace se pohybuje pod hranicí doporučeného množství. Listová zelenina obsazuje zhruba 5 % z celkové spotřeby ovoce a zeleniny (Kennedy 2011). Celosvětově spotřeba salátových a listových zelenin nicméně mírně stoupá a narůstá také zájem o pěstování a spotřebu takzvaných asijských zeleninových směsí používaných k výrobě salátů (Bartoš et al. 2000).

V ČR je spotřeba salátové a listové zeleniny spíše neuspokojivá a podle Situační a výhledové zprávy Ministerstva zemědělství (2023) konzumace špenátu a listových salátů převážně stagnuje. Například spotřeba špenátu se dlouhodobě pohybuje na hodnotě mírně nad 1 kilogram na člověka za rok, spotřeba listových salátů je zhruba 2 kg na člověka za rok. Zpráva dále uvádí, že v posledních letech dochází k poklesu pěstebních ploch salátů v ČR a také k nárůstu cen listové zeleniny. Sklizňová plocha salátů v ČR v roce 2022 byla 676 ha, celková sklizeň se pohybovala okolo 12 000 tun a dovoz salátů ze zahraničí byl více než dvojnásobný. Co se týče spotřeby listové zeleniny, je zaznamenán trend v přípravě a konzumaci salátových směsí určených pro přímou spotřebu.

Do skupiny listových zelenin se řadí mnoho druhů rostlin z různých botanických čeledí. Výhoda pěstování listové zeleniny je obvykle ve velmi krátké vegetační době, řadí se sem ale i několik vytrvalých druhů. Nejvyšší spotřeba listové zeleniny je v čerstvém stavu, některé druhy jsou ale vhodné i pro tepelnou úpravu, konzervaci či zmrazení. Celkově je produkce listové zeleniny ve srovnání s ostatními druhy nízká, ale do budoucna se očekává postupné zvyšování poptávky. Netradiční druhy listové zeleniny totiž nabízí možnost obohacení domácího trhu a mohou také přispět ke zpestření a obohacení stravy (Bartoš et al. 2000).

Nejčastěji konzumovaným druhem v ČR je salát ledový, konzumace salátu hlávkového mírně klesá, a naopak se zvyšuje poptávka po salátech listových. S nárůstem zájmu spotřebitelů o další druhy listové zeleniny, které jsou dostupné převážně z dovozu, roste také příležitost pro domácí pěstitele. Důvodem je zvyšující se zájem o výrobu salátových chlazených směsí, které vyžadují plynulé zásobování různorodým sortimentem. Listová zelenina velmi rychle ztrácí čerstvost a má tedy relativně krátkou dobu uchovatelnosti. Domácí pěstování by tento problém do určité míry vyřešilo zkrácením přepravní vzdálenosti (Petříková et al. 2012). Většinu druhů listové zeleniny je možné v našich půdních a klimatických podmínkách úspěšně pěstovat a díky jejich krátké vegetační době je možné je do osevních postupů zařadit jako předplodinu či následnou plodinu (Petříková et al. 2006).

Kromě tradičního pěstování listové zeleniny v půdním médiu se dnes čím dál více rozšiřuje možnost pěstování zeleniny a ovoce v hydroponických či aeroponických systémech. Rostliny pěstované hydroponicky mají kořenový systém ponořený ve vodním roztoku, jehož hodnoty jsou neustále kontrolovány a upravovány. Aeroponické pěstování na rozdíl od toho využívá pouze trysek či zamlžení, kterým se ke kořenům visícím ve vzduchu dostává voda a živiny. Při použití tohoto systému rostou kořeny ve tmě a mají lepší přístup ke kyslíku. Obě tyto moderní pěstební metody přinášejí mnoho výhod, jako je například možnost celoročního

pěstování, efektivnější příjem živin, rychlejší růst či vyšší výnos. Umožňují tedy zintenzivnění pěstování listové zeleniny, která v tomto prostředí roste rychle a výhodně (Kumar et al. 2023).

3.3.2 Nutriční hodnota

Jelikož se listová zelenina konzumuje převážně v čerstvém stavu, je pro výživu člověka obzvláště důležitá. Čerstvé listové saláty jsou významné svojí nutriční hodnotou – ze zdravotně důležitých látek obsahují dle druhu například různé minerály, provitamin A, vitamín C, kyselinu listovou, hořčiny či inulin (Petříková et al. 2000).

Na množství a typu užitečných látek obsažených v listové zelenině má vliv také genotyp. Různé druhy listové zeleniny mohou obsahovat například odlišné množství chlorofylu, což je možné rozlišit i podle odstínu a sytosti zelené barvy listů. Špenát s tmavě zelenými listy má vyšší obsah chlorofylu než ledový salát, který má typicky světlejší a vodnatější pletivo. Rozdílný může být i obsah prospěšných hořčin, které se projevují ostřejší chutí zeleniny. Starší a tužší listy obvykle obsahují větší množství vlákniny, což nemusí být vždy žádoucí vlastnost. Odrůdy s červeně či fialově zbarvenými listy obsahují na rozdíl od běžnějších zelených také větší množství zdraví prospěšného barviva antokyanu (Petříková et al. 2012).

Ve srovnání s exotickými druhy ovoce a zeleniny poskytují tradiční druhy listové zeleniny dobrou nutriční hodnotu za nízkou pěstební i kupní cenu. V různých částech světa se nacházejí domácí druhy a odrůdy listové zeleniny, které jsou dlouhodobě pěstované za kulinářskými i léčebnými účely. Listová zelenina má obecně spíše nízkou kalorickou hodnotu, ale je velmi bohatá na živiny, které hrají důležitou roli ve vyvážené stravě člověka. Bioaktivní látky v listové zelenině mají antimikrobiální a antioxidační účinky, dále pomáhají udržovat správnou hladinu cukru v krvi a jsou prospěšné na trávení a chudokrevnost. Čerstvá listová zelenina jako součást stravy také vyvažuje nadměrnou konzumaci průmyslově zpracovaných potravin s množstvím přidaných látek a působí jako prevence proti mnohým civilizačním chorobám (Randhawa et al. 2015).

Potenciál listové zeleniny spočívá také v nízkých nákladech na pěstování a možnosti poskytnutí nutričně výhodné stravy i v rozvojových zemích. Finančně dostupné potraviny, jako je kukuřice, rýže, pšenice, maniok či brambory jsou nejčastěji konzumované plodiny, ale po jejich průmyslovém zpracování se významně snižuje jejich nutriční hodnota. Ve srovnání s těmito potravinami obsahují různé druhy listové zeleniny výrazně vyšší množství vitamínů, bílkovin či například železa. Listová zelenina má také dobrý poměr mezi množstvím živin a kalorií. S relativně malým množstvím kalorií je bohatá na živiny, což ji řadí mezi potraviny vhodné pro udržení zdravé váhy, které zároveň poskytují velké množství zdraví prospěšných látek (Kennedy 2011).

Na přínos listové zeleniny ve stravě má vliv i správná agrotechnika a půdní a klimatické podmínky. Nutriční a energetická hodnota pěstované zeleniny je ovlivněna v případě přítomnosti stresových faktorů, které mohou během pěstování snížit množství hodnotných látek. Listová zelenina se v případě negativního působení pěstebního prostředí soustřeďuje na obranu a přežití, čímž může dojít ke snížení tvorby a ukládání asimilátů a člověku prospěšných látek. Stres také ovlivňuje příjem živin z půdy a vede k nedostatečné výživě rostlinného

organismu. Pro pěstování listové zeleniny za účelem využití jejího plného potenciálu je tedy nutné dodržovat správné pěstební postupy a poskytnout rostlinám optimální podmínky pro správný růst (Ncama et al. 2022).

3.3.3 Pěstování netradičních druhů listové zeleniny

Mezi nejčastěji pěstované druhy listové zeleniny v Evropě patří locika setá, špenát setý a roseta setá, které se běžně pěstují ve formě různých kultivarů (Randhawa et al. 2015). Rozvoj mezinárodního trhu, rozšiřování zahraniční kuchyně a také obor šlechtitelství ovšem přispívají k nárůstu sortimentu druhů a odrůd, které se dostávají i na český trh. Jelikož se listová zelenina nejčastěji konzumuje v podobě čerstvých míchaných salátů, roste také zájem o rozmanitost textur a chutí, které mohou obohatit tradiční druhy (Petříková et al. 2012).

Čím dál více populární se dnes stává asijská listová zelenina, která je dovážena do zemí po celém světě. Konzumentům nabízí obohacení jídelníčku, vizuální a chuťové rozšíření sortimentu a je také zajímavá z hlediska nutričního přínosu. Asijská listová zelenina odpovídá také aktuálním trendům evropského trhu v rámci dostupnosti zdravé a čerstvé zeleniny s dobrou výživovou hodnotou, která není náročná na pěstební podmínky a při lokálním pěstování je rychle dostupná v kvalitním stavu (Hong & Gruda 2020).

Pekingské zelí a čínské zelí, také známé pod názvem pak choi, jsou dvě asijské listové zeleniny, které se v Evropě staly rychle velmi oblíbenými. Tyto druhy nejsou chuťově příliš odlišné od tradičnější listové zeleniny, ale díky zajímavému a exotickému vzhledu si dokázaly upevnit místo mezi stálým sortimentem (Hong & Gruda 2020). V posledních letech začíná být poptávka také po méně tradičních druzích, které konzumenty přitahují neobvyklou chutí či zajímavou texturou, barvou a tvarem listů. Mezi tyto druhy se řadí například mizuna, mibuna, perila křovitá, čínská hořčice a čínská brokolice (Petříková et al. 2012). Z nutričního hlediska obsahují tyto druhy různé typy zdravých přírodních sloučenin jako jsou antokyany, karotenoidy, flavonoidy a další fenolické sloučeniny, které mají významné antioxidační účinky a konzumují se také z důvodu prevence proti mnohým chorobám. Některé z těchto druhů se do Evropy pouze dovážejí, jiné jsou v malém množství pěstovány převážně ve sklenících a také v hydroponických systémech (Hong & Gruda 2020).

Větší povědomí o netradičních druzích listové zeleniny by také mohlo mít efekt na zvýšení konzumace zeleniny, která je dlouhodobě pod hranicí doporučených hodnot. Zpestření sortimentu přitahuje zájem o nové druhy, které přinášejí konzumentům možnost vyzkoušet netradiční chutě z jiných zemí. Obzvláště během zimy, kdy je trh s domácí zeleninou značně omezen, se naskýtá příležitost obohatit nabídku o tyto netradiční druhy a přispět tak k navýšení spotřeby čerstvé zeleniny (Florkowski 2008).

4 Metodika

U vybraných druhů asijské listové zeleniny byl sledován vliv genotypu na hodnoty spalného tepla.

4.1 Charakteristika rostlinného materiálu

Pro pokus byly použity tři druhy asijské listové zeleniny – pak choi, mizuna a perila. Od každého druhu byly vybrány dva kultivary, jeden se zelenými a druhý s červenými listy.

Pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis* (L.) Hanelt) je jednoletá rostlina původem z východní Asie. Tato listová zelenina nevytváří hlávky, ale pouze polovzpřímené listové růžice tvořené silně řapíkatými listy. Řapík je obvykle bílé či světlé barvy, dužnatý a několik desítek milimetrů široký. Listy jsou nejčastěji zelené, lesklé, zaoblené, zpravidla na okraji mírně zvlněné. Pak choi se nejčastěji konzumuje po tepelné úpravě, méně často i v čerstvém stavu. Přínosem této listové zeleniny je relativně vysoký obsah vitamínu C a minerálních látek, jako je P, Mg či Zn (Bartoš et al. 2000). Pro pokus byl použit zelenolistý kultivar 'Atari F1', který se vyznačuje světle zelenou barvou listů a bílými stonky. Listy této odrůdy rostou vzpřímeně, což je přínosné pro předejití kontaktu listů s půdou, čímž je možné zabránit napadení rostliny půdní plísní. Druhý zvolený kultivar, červenolistý 'Baraku F1', je typický svými tmavými, téměř černými listy s jemně vroubkovaným okrajem (www.zesemen.cz).

Mizuna (*Brassica rapa* subsp. *Japonica* Shebalina) patří mezi méně tradiční listovou zeleninu, kterou je dnes možné najít jako součást směsi čerstvých salátů. Mizuna dorůstá výšky 30 cm a vytváří husté přízemní růžice. Tvoří poměrně dlouhé, lehce zdužnatělé řapíky a má výrazně vykrajované listy. K dostání je v různých barvách od žlutozelené po fialovou. Tato listová zelenina je bohatá na řadu minerálních látek (K, Ca, Mg) a obsahuje také důležité vitamíny (A, B, C, kyselinu listovou) (Petříková et al. 2012). Součástí pokusu byl kultivar 'Waido' s širokými zelenými listy a bíle zbarveným stonkem. Tato odrůda dorůstá výšky 45 cm, má intenzivní chuť, je velmi rychle rostoucí a nenáročná na teplotu. Druhý kultivar 'Red Knight F1' s červenofialovými listy se vyznačuje pikantní chutí a nenáročností na pěstební podmínky (www.zesemen.cz).

Perila křovitá (*Perilla frutescens* (L.) Britton) je asijská zelenina z čeledi hluchavkovitých. Tato rostlina má srdčité listy se zubatým okrajem a vzhledově je často přirovnávána ke kopřivě. V čínské medicíně je perila považována za léčivou rostlinu a využívá se na široké spektrum zdravotních obtíží. Ceněný je také olej ze semen perily, který je stejně jako listy využíván v asijské kuchyni, ale také jako součást tradiční medicíny. Perila je k dostání v zelené variantě, ale běžnější je nafialovělé či výrazně fialové zbarvení listů (Dhyani 2019). Pro pokus byla vybrána běžná varianta zelenolisté perily křovité bez kultivaru a červenolistý kultivar (*Perilla frutescens* var. *crispa*). Perila se zelenými listy se obvykle dorůstá výšky do 60 cm a má nasládlou citrusovou chuť (www.semenaonline.cz). Rostliny s červenými listy nebyly vysazené do pěstebních systémů a nejsou součástí vyhodnocování výsledků pokusu.

4.2 Založení pokusu

Pokus byl založen v Ústavu experimentální botaniky AV ČR, v.v.i, v Praze – Lysolajích. Semena vybraných druhů byla vyseta do rockwoolových kostek značky Godan, které byly vybrány jako vhodný materiál pro následné pěstování rostlin v hydroponickém a aeroponickém systému. Tato technologie využívá inertní minerální vatu, která poskytuje vhodné prostředí pro rychlé vytvoření zdravého kořenového systému. Po zhruba dvaceti dnech se uskutečnila výsadba do vybraných systémů. U červenolisté varianty perily křovité nicméně nedošlo k dostatečnému vývinu kořenového systému a všechny rostliny byly proto v této fázi z pokusu odstraněny.

Rostlinný materiál byl poté rozdělen do dvou variant – část rostlin byla pěstovaná hydroponicky a část aeroponicky. Po zakořenění rostlin byly použity 3-4 kusy od každé odrůdy a ty byly přesazeny do hydroponického systému. Pro aeroponické pěstování bylo použito 4-5 kusů od každé odrůdy. Po dobu necelých dvou měsíců byly v obou systémech udržovány konstantní podmínky týkající se vnitřního osvětlení a teploty vzduchu a vody. Pro dodání živin byl během pěstování použit Hoaglandův roztok ve 14denních odstupech. Složení živného roztoku je uvedeno v Tabulce 1. Rostliny byly pěstovány v prostředí bez vlivu stresových faktorů a za přirozeného světelného režimu 14/10 hodin. Teplotní režim byl 25 °C ve dne a v noci 19 °C. Relativní vlhkost vzduchu byla 65 %. Po 74 dnech od založení pokusu byly rostliny sklizeny.

Složení Hoaglandova roztoku			
Makronutrienty		Mikronutrienty	
Název	Množství	Název	Množství
Ca(NO ₃) ₂	0,821 g	H ₃ BO ₃	0,0028 g
KNO ₃	0,506 g	(MnCl ₂).4H ₂ O	0,0018 g
KH ₂ PO ₄	0,136 g	(ZnSO ₄).7H ₂ O	0,0002 g
MgSO ₄	0,120 g	(CuSO ₄).5H ₂ O	0,0001 g
		NaMoO ₄	0,000025 g
		FeSO ₄	0,0078 g

Tabulka 1: Chemické složení Hoaglandova živného roztoku
(upraveno podle Hoagland & Aron 1950)

4.3 Stanovení hmotnosti sušiny

Hmotnost sušiny byla stanovena standardními metodami dle Šestáka a kol. (1960), kdy rostlinný materiál byl umístěn do sušárny a sušen při teplotě 80 °C do konstantní hmotnosti. Po namletí byly vzorky naváženy na 0,5 g na analytických laboratorních vahách Ohaus AX124.

4.4 Stanovení spalného tepla

Vzorky rostlinného materiálu po sušení byly homogenizovány na rychlomlýnku p14 FRITCH na velikost částic 0,2 mm. Energetický obsah ve vzorcích byl sledován metodou spalné kalorimetrie, úplné spálení vzorku probíhalo ve 100% kyslíkové atmosféře při tlaku 30 MPa. Ke spálení vzorku byl použit parabolický kalorimetr IKA C200 (firma IKA, SRN). Pro stanovení spalného tepla rostlinného materiálu byly použity normy ČSN EN 14918 a ČSN ISO 1928.

Hodnota spalného tepla byla vypočtena z opravného teplotního vzestupu a efektivní tepelné kapacity kalorimetru, se zřetelem na podíly energie při zapálení, spálení zapalovacího prostředku a tepelné účinky z vedlejších reakcí. Hodnota výhřevnosti vzorku byla vypočtena z hodnoty spalného tepla zmenšené o výparné teplo vody vzniklé z paliva během hoření po započítání oprav (spalné teplo kyseliny sírové a kyseliny dusičné vznikajících vedlejší reakcí).

Pro výpočet spalného tepla byl použit následující vztah:

$$Q = \frac{(C \cdot Dt) - c}{mv - mp}$$

Kde: Q = spalné teplo vzorku

C = tepelná kapacita kalorimetru

Dt = celkový vzestup teploty (°C)

c = součet oprav (spalné teplo HNO₃ + H₂SO₄)

mv = hmotnost navážky vzorku

mp = hmotnost popelovin

5 Výsledky

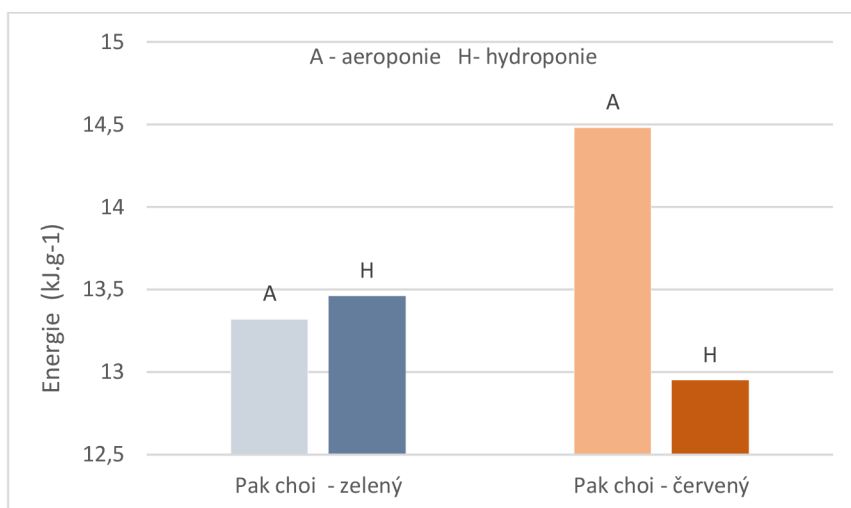
V pokusu byl sledován vliv genotypu a způsobu pěstování na obsah energie tří vybraných druhů asijské listové zeleniny.

5.1 Spalné teplo jednotlivých druhů listové zeleniny

5.1.1 Pak choi

Z grafu 1 je patrné, že se energetická hodnota pak choi liší podle pěstované odrůdy i na základě odlišné pěstební metody. Nejvyšší obsah energie byl zaznamenán u červenolisté odrůdy pěstované aeroponicky ($14,48 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). U zelenolisté odrůdy v aeroponickém systému dosahuje hodnota energie $13,32 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Nejnižší hodnota spalného tepla byla naměřena u červenolisté odrůdy v hydroponickém systému ($12,95 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a u zelenolisté odrůdy v téže pěstební prostředí byla hodnota spalného tepla $13,48 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$.

V případě zelenolisté odrůdy nebyl zaznamenán průkazný vliv technologie pěstování na obsah energie, neboť zjištěný rozdíl činil 1,05 % s vyšším energetickým obsahem při hydroponickém pěstování, což je v přepočtu $0,14 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Naopak rozdíl v obsahu energie byl zaznamenán u červenolisté odrůdy, kdy v případě aeroponického pěstování byla hodnota energie o 11,82 % vyšší než u rostliny pěstovaných v hydroponii. Přepočtením na energetický ekvivalent se jednalo o rozdíl $1,53 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$.



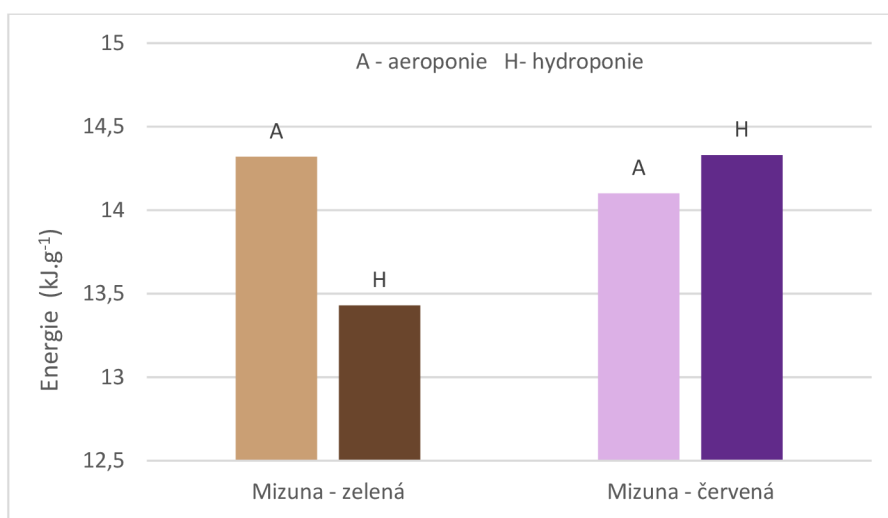
Graf 1: Srovnání hodnot spalného tepla ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) rostlin pak choi v rámci odrůd a technologií pěstování

5.1.2 Mizuna

Z hodnot spalného tepla mizuny vyplývá rozdíl mezi odrůdami s odlišným zbarvením listů a také mezi pěstebními systémy. Z grafu 2 je patrné, že nejvyšší energetická hodnota byla naměřena u zelenolisté mizuny pěstované v aeroponickém prostředí ($14,32 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), kdežto u červenolisté odrůdy byl obsah u rostlin pěstovaných v aeroponii $14,10 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Nejvyšší

naměřená hodnota spalného tepla byla stanovena u červenolisté mizuny pěstované v hydroponickém prostředí ($14,33 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a naopak nejnižší u rostlin v téže pěstební prostředí ale se zeleným zbarvením listů ($13,43 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).

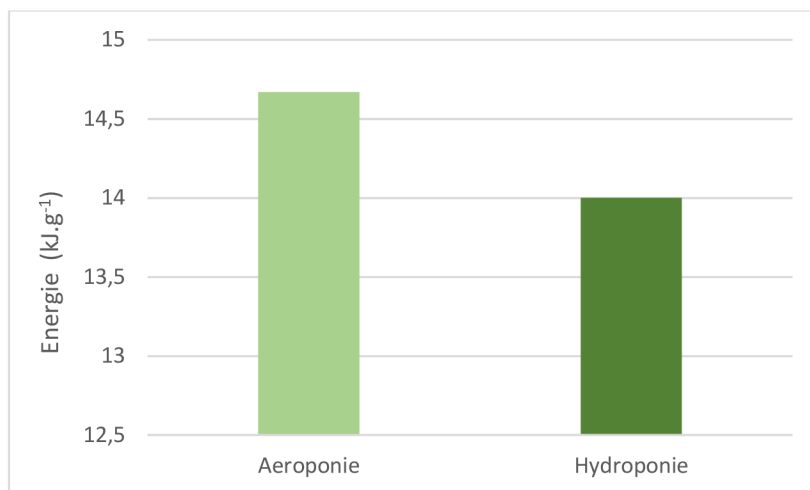
V případě mizuny byl zaznamenán v porovnání s pak choi zcela opačný trend v reakci na pěstební prostředí, neboť obsah energie u červenolisté odrůdy pěstované v hydroponii nevykazoval významné změny v hodnotách této charakteristiky. Získaný rozdíl činil 1,63 %, což představuje $0,23 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Naopak u odrůdy se zelenými listy byla energetická hodnota vyšší u rostlin pěstovaných v aeroponickém systému. Naměřený rozdíl byl 6,63 % ($0,89 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) ve prospěch aeroponie.



Graf 2: Srovnání hodnot spalného tepla ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) rostlin mizuny v rámci odrůd a technologií pěstování

5.1.3 Perila

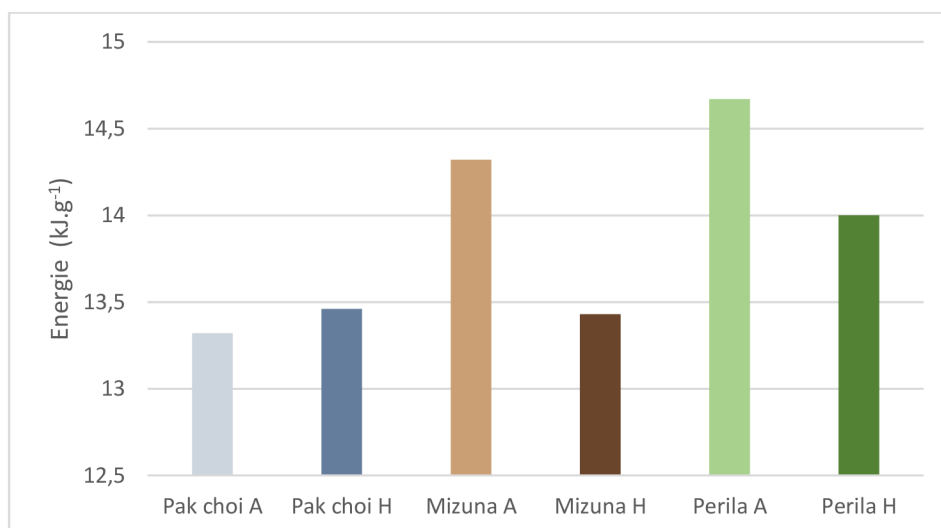
V případě perily křovité bylo možné porovnávat hodnoty pouze u vypěstovaných zelenolistých jedinců. Z grafu 3 lze vyvodit, že mezi jednotlivými způsoby pěstování byly zjištěny rozdíly. Vyšší energetická hodnota byla naměřena při aeroponickém pěstování ($14,67 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), zatímco u rostlin pěstovaných hydroponicky byl obsah energie nižší o 4,57 % ($14,00 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).



Graf 3: Srovnání hodnot spalného tepla (kJ·g⁻¹) rostlin zelenolisté perily v rámci technologií pěstování

5.2 Vliv listového zbarvení

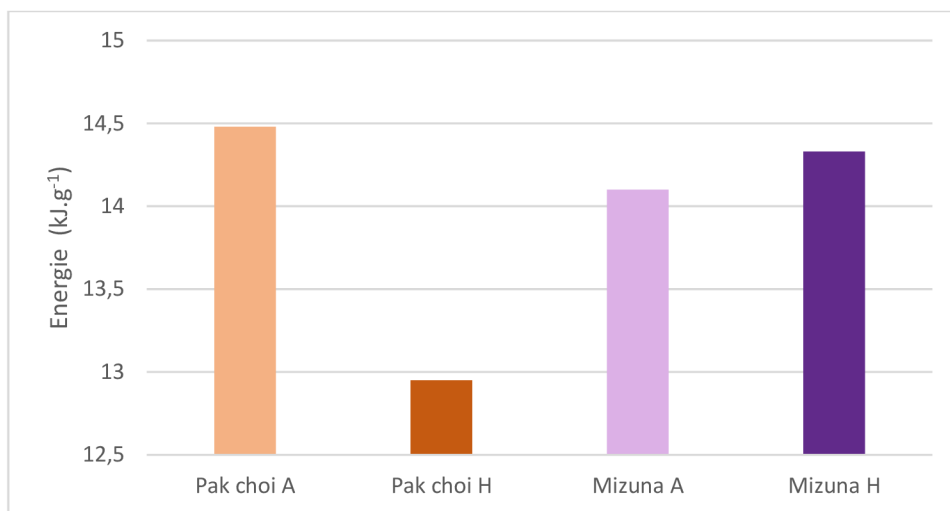
Z grafu 4 je patrné, že zeleně zbarvenou rostlinou s nejvyšším energetickým obsahem byla perila pěstovaná v aeroponickém systému, kdy u této rostliny byl obsah energie 14,67 kJ·g⁻¹. Dále následuje mizuna pěstovaná v aeroponii (14,32 kJ·g⁻¹). V rámci hydroponického systému byl nejvyšší obsah energie stanoven u perily (14,00 kJ·g⁻¹) a nejnižší hodnota byla zaznamenána u rostlin pak choi pěstovaných v aeroponickém prostředí (13,32 kJ·g⁻¹). Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou činil 1,35 kJ·g⁻¹ (10,14 %).



Graf 4: Srovnání energetické hodnoty (kJ·g⁻¹) u rostlin se zelenými listy v rámci pěstebního systému

V grafu 5 jsou uvedeny hodnoty obsahu energie červenolistých odrůd, bez červeně zbarvené perily. I tak je možné zaznamenat rozdíl mezi jednotlivými odrůdami, neboť nejvyšší energetický obsah byl naměřen u pak choi pěstovaných aeroponicky (14,48 kJ·g⁻¹), dále u

rostlin mizuna z hydroponického systému ($14,33 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Nejnižší energetický obsah byl zjištěn u hydroponicky pěstovaných rostlin pak choi ($12,95 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), kdy rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou činil $1,53 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ (11,81 %).

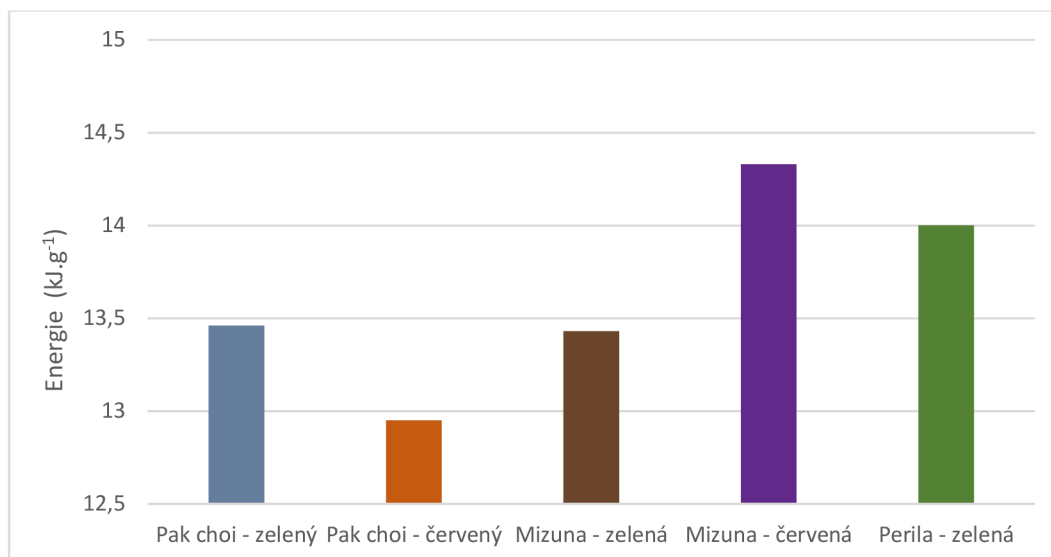


Graf 5: Srovnání energetické hodnoty ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) u rostlin s červenými listy v rámci pěstebního systému

V grafech 4 a 5 jsou zaznamenány energetické hodnoty u jedinců se stejným zbarvením listů. Tyto hodnoty ovšem nepoukazují na žádný trend, podle kterého by bylo možné jasně určit vliv zbarvení na akumulaci energie v rostlinách. Mezi červeným a zeleným zbarvením nebyl pozorován výrazný rozdíl v hodnotách spalného tepla. Rostliny ze dvou skupin barevných variant mají podobné energetické hodnoty s neprůkaznými rozdíly u obou skupin. Zdá se, že tyto rozdíly nezávisí výhradně na barvě listů, ale spíše na druhové rozdílnosti a na pěstebním prostředí. Nelze tedy usoudit, že by měla pouze tato vlastnost sama o sobě výrazný vliv na efektivitu asimilace a následné ukládání energie v nadzemní části rostlin.

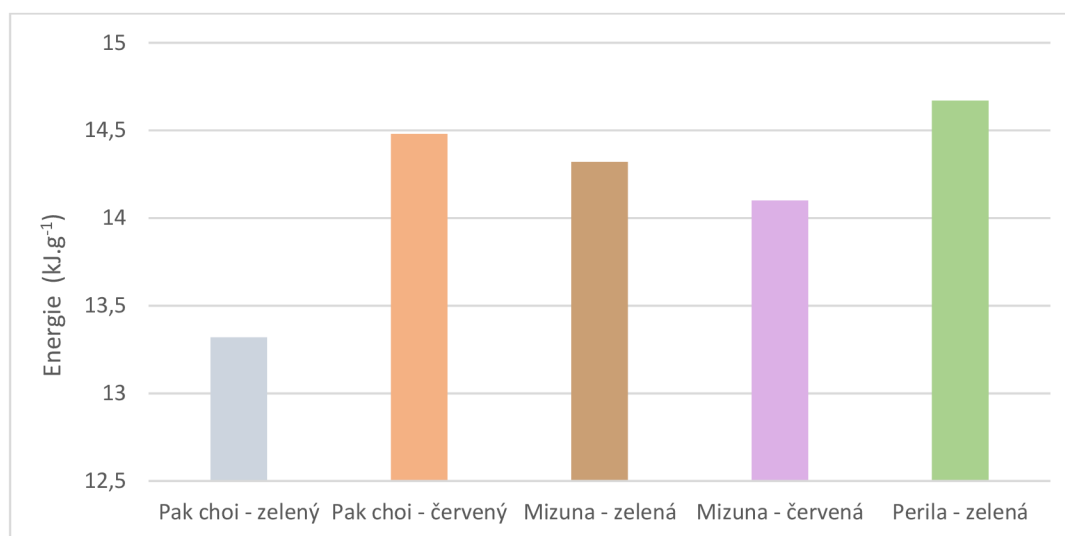
5.3 Vliv pěstování na obsah energie

V hydroponickém systému dle hodnot uvedených v grafu 6 měly vyšší obsah rostliny mizuny s červeně zbarveným listem ($14,33 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Naopak nejnižší obsah energie byl naměřen u červenolisté odrůdy pak choi ($12,95 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami činil $1,38 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, kdy obsah energie byl o 9,63 % vyšší u mizuny.



Graf 6: Změny hodnot spalného tepla (kJ·g⁻¹) u rostlin vybraných druhů pěstovaných hydroponicky

Změny obsahu energie u rostlin pěstovaných v aeroponii jsou zaznamenány v grafu 7. Z něho je patrné, že u aeroponicky pěstovaných rostlin byl nejvyšší energetický obsah zjištěn u perily se zeleným zbarvením listů (14,67 kJ·g⁻¹). Na straně druhé byl nejnižší energetický obsah stanoven u zelené odrůdy pak choi (13,32 kJ·g⁻¹). Rozdíl mezi těmito hodnotami činil 10,14 %, v přepočtu na energetický ekvivalent se jednalo o 1,35 kJ·g⁻¹



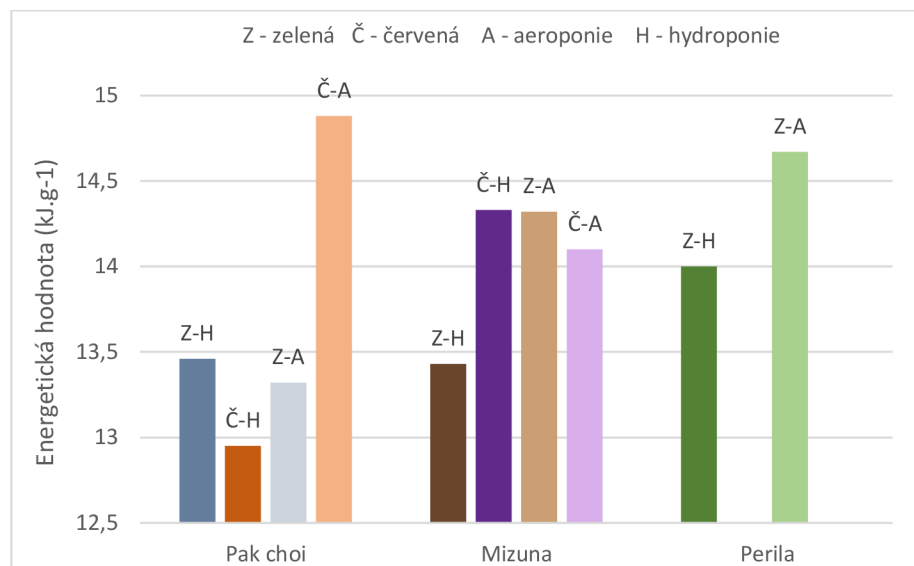
Graf 7: Změny hodnot spalného tepla (kJ·g⁻¹) u rostlin vybraných druhů pěstovaných aeroponicky

Grafy 6 a 7 potvrzují vliv barvy listů a systému pěstování na obsah energie. Vyšší obsah energie u červenolistých odrůd byl zjištěn při pěstování aeroponicky (14,29 kJ·g⁻¹) ve srovnání s hydroponií (13,64 kJ·g⁻¹). Stejně tak tomu bylo u zelenolistých odrůd, u kterých byla naměřená hodnota v aeroponickém systému 14,10 kJ·g⁻¹ a v systému hydroponickém 13,63 kJ·g⁻¹.

Z těchto grafů je tedy možné vyvodit, že hlavním vlivem na odlišný energetický obsah v rozdílných prostředích byl genotyp jednotlivých odrůd. V rámci pěstebních systémů nebyly zjištěny rozdíly, které by měly vliv na odlišné hodnoty týkající se tvorby a ukládání asimilátů.

5.4 Srovnání energetické hodnoty

Následující graf 8 obsahuje srovnání průměrné energetické hodnoty u všech pěstovaných rostlin s ohledem na druh a odrůdu, zbarvení listů a pěstební metodu.



Graf 8: Změny obsahu energie (kJ·g⁻¹) vybraných druhů zelenin v závislosti na barvě listu a systému pěstování

Z grafu 8 je patrné, že všechny pěstované varianty vykazují rozdílnou energetickou hodnotu. V rámci hodnocení průměrných hodnot obsahu energie u rostlin téže odrůdy z hydroponického i aeroponického prostředí byl zjištěn nejnižší energetický obsah u pak choi se zeleně zbarvenými listy (13,39 kJ·g⁻¹). Odrůdou s nejvyšší energetickou hodnotou byla zelenolistá perila (14,34 kJ·g⁻¹). Nejvyšší rozdíly bylo možné pozorovat u rostlin pak choi. Tento druh měl ze všech tří průměrně nejnižší energetickou hodnotu, kromě červenolisté varianty z aeroponického prostředí, u které byl zjištěn naopak nejvyšší obsah energie. Rostliny z aeroponie vykazují vyšší obsah energie (14,28 kJ·g⁻¹) v porovnání s rostlinami z hydroponického prostředí (13,66 kJ·g⁻¹).

6 Diskuse

Z výsledků měření spalného tepla vybraných rostlin je patrné, že hodnota energetického obsahu jejich nadzemní části byla ovlivněna mimo jiné i genotypem dané rostliny. Odlišné odrůdy listové zeleniny byly pěstovány ve dvou různých systémech – aeroponickém a hydroponickém za stejných podmínek pěstování. Rozdílná energetická hodnota zkoumané listové zeleniny je ovlivňována mezidruhovými rozdíly a také rozdíly v rámci odrůd. Uvedený závěr potvrzují například Eimil-Fraga et al. (2019), kteří zaznamenali významný rozdíl v energetickém obsahu sklizené biomasy u odlišných odrůd. Ke stejnému závěru došli Walia et al. (2009) vyhodnocením odlišné reakce zkoumaných rostlinných druhů na stres, což se projevilo také na jejich energetickém obsahu. Jejich poznatky potvrzují vliv rostlinného genotypu na energetickou hodnotu biomasy.

Množství a typy sloučenin, které tvoří biomasu zkoumaných rostlin, jsou u různých genotypů odlišné, čímž je ovlivněna hodnota energie uložené v těchto sloučeninách. Toto potvrzují Alamu et al. (2022) podle kterých je genetická variabilita nezbytným faktorem přispívajícím k biochemické a nutriční variabilitě rostlin. Toto bylo prokázáno i během pokusu, jelikož vybrané druhy listové zeleniny měly odlišnou nutriční hodnotu, a tedy i obsah látek. K obdobným výsledkům došli také Hnilička et al. (2010) při zkoumání vlivu genotypu na obsah energeticky bohatých látek u různých odrůd ječmene. Ve své práci potvrzují vliv odrůdy na obsah energie a podobné výsledky je dle autorů možné pozorovat také u různých píceňích trav či jetelovin.

Pearcy et al. (1996) prokázali vliv genotypu na schopnost rostlin reagovat na změny v dostupnosti světelné energie. Během pokusu byla listová zelenina pěstována v prostředí s pravidelným světelným režimem (14/10) a odlišnou mírou fotosyntézy jednotlivých odrůd v reakci na změny v osvětlení tedy nebylo možné potvrdit.

Dle Santos et al. (2021) existují v rámci různých genotypů odlišné nároky na výživu. Ke stejnému závěru vedou i výsledky pokusu, neboť rostliny červenolisté odrůdy pak choi a zelenolisté odrůdy mizuny a perily lépe prospívaly v aeroponii, zatímco při hydroponickém pěstování lépe prospívaly rostliny pak choi se zeleným zbarvením a rostliny červenolisté mizuny. Toto potvrzují také Hoeber et al. (2017), kteří naměřili odlišný energetický obsah v biomase při hodnocení totožných odrůd pěstovaných v prostředích s odlišným obsahem živin v půdě.

Na energetickou hodnotu vybraných druhů tedy mělo vliv také pěstební prostředí, konkrétně rozdílná metoda pěstování pomocí aeroponického a hydroponického systému. Při zkoumání obsahu energie rostlin téže odrůdy pěstované v odlišném systému byl patrný vliv prostředí na hodnoty spalného tepla. Njugun et al. (2018) ve své práci prokázali vliv prostředí na nutriční složení pěstovaných plodin a také významnou interakce mezi genotypem a prostředím, která má taktéž vliv na vývoj rostlin. Toto potvrzuje také Reichle (2019), podle kterého mají hodnoty abiotických faktorů prostředí vliv například na míru fotosyntézy a respirace, transport a alokaci asimilátů a dalších rostlinných procesů, které ovlivňují množství energie uložené v rostlinné biomase.

Pozitivní vliv aeroponického systému zaznamenali Kumar et al. (2023), kteří uvádějí, že při správném pěstebním postupu může aeroponické pěstování ve srovnání s hydroponickým zajistit rychlejší růst rostlin, zkvalitnění kořenového systému a vyšší výnos. Tomuto tvrzení odpovídají naměřené hodnoty u rostlin listové zeleniny, které měly průměrnou energetickou hodnotu o něco vyšší při pěstování v aeroponickém systému.

Odrůdy tří druhů listové zeleniny se také lišily listovým zbarvením, které by mohlo mít do určité míry vliv na energetický obsah jednotlivých rostlin. Podle Shi et al. (2022) se množství a typy pigmentů u rostlin liší na základě genotypu. Jednotlivé odrůdy listové zeleniny také obsahovaly různé množství chlorofylu, antokyanů a dalších barviv. Proto je možné v souladu s tvrzením uvedených autorů konstatovat, že na rychlost fotosyntézy a energetický obsah má vliv množství a druhy pigmentů a tyto hodnoty se liší v rámci odlišných odrůd.

Podle Kim et al. (2016) se hodnota obsahu různých barviv ale také odvíjí od pěstebních podmínek, které ovlivňují míru a intenzitu asimilace. Vyšší obsah antokyanů se obvykle nachází u rostlin pěstovaných v polních podmínkách s dostatečným množstvím dostupného slunečního záření. Významný vliv těchto látek, především antokyanů, na celkový energetický obsah listové zeleniny nicméně nebyl prokázán, neboť se jednalo o laboratorní podmínky s nastaveným pěstebním režimem.

7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala vlivem genotypu na hodnoty spalného tepla vybraných druhů netradiční listové zeleniny. V teoretické a praktické části byla zkoumána metoda kalorimetrického měření a možnost jejího využití ve fyziologii rostlin. Pomocí spalné kalorimetrie byly měřeny hodnoty spalného tepla odlišných odrůd asijské listové zeleniny za účelem vyhodnocení vlivu genotypu na energetický obsah daných odrůd.

Z práce vyplívají následující závěry:

- Kalorimetrie nachází velmi široké uplatnění jako součást termické analýzy v mnohých vědních oborech.
- Využití spalné kalorimetrie umožňuje měření energetického obsahu, a proto je možné ji využít i v rámci sledování transportu a ukládání asimilátů v různých rostlinných orgánech, sledování růstu a vývoje rostlin a hodnocení vlivu stresových faktorů.
- Na energetickou hodnotu zkoumaných druhů listové zeleniny měl vliv genotyp vybraných odrůd a také pěstební prostředí, ve kterém byly rostliny pěstované.
- V případě pak choi byl nejvyšší obsah energie zaznamenán u červenolisté odrůdy pěstované aeroponicky ($14,48 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a nejnižší u téže odrůdy v hydroponickém prostředí ($12,95 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- U rostlin mizuny byl nejvyšší energetický obsah stanoven u červenolisté odrůdy pěstované v hydroponickém prostředí ($14,33 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a naopak nejnižší naměřená hodnota byla u rostlin v téže pěstebním prostředí, ale se zeleným zbarvením listů ($13,43 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Rostliny zelenolisté perily měly vyšší energetickou hodnotu při aeroponickém pěstování ($14,67 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) ve srovnání s hydroponickým ($14,00 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- V aeroponickém systému byl nejvyšší obsah energie naměřen u zelenolisté perily ($14,67 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a nejnižší u zelenolisté odrůdy pak choi ($13,32 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- V hydroponickém prostředí měly nejvyšší obsah energie rostliny červenolisté mizuny ($14,33 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a nejnižší rostliny červenolisté pak choi ($12,95 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Průměrná hodnota spalného tepla byla vyšší u rostlin pěstovaných v aeroponickém prostředí ($14,28 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) ve srovnání s rostlinami z hydroponického prostředí ($13,66 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Rostliny s červeným a zeleným zbarvením listů měly odlišný energetický obsah. Nicméně nebylo prokázáno, že by pouze zbarvení listů mělo významný vliv na vyšší obsah energie.
- Druh s nejnižším energetickým obsahem byl pak choi ($13,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) a s nejvyšším perila ($14,3 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Odrůdou s nejnižším obsahem energie bylo pak choi se zeleně zbarvenými listy ($13,39 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$). Nejvyšší energetická hodnota byla naměřena u zelenolisté perily ($14,34 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Spalná kalorimetrie je vhodnou metodou pro zkoumání fotosyntetické výkonnosti rostlin kvantitativním měřením energie uložené v organických sloučeninách tvořících

rostlinnou biomasu. Vyhodnocením a porovnáním hodnot spalného tepla zkoumaných rostlin je možné pozorovat také vliv genotypu a prostředí, což jsou faktory, které proces fotosyntézy ovlivňují.

8 Literatura

- Abrahamson WG, Caswell H. 1982. On the Comparative Allocation of Biomass, Energy and Nutrients in Plants. *Ecology* **63**:982-991.
- Alamu EO, Menkir A, Adesokan M, Fawole S, Maziya-Dixon B. 2022. Assessment of the Effects of Genotype, Location, and Planting Season on the Nutritional Composition and the Metabolizable Energy of Advanced Twenty-Five Maize Hybrids. *International Journal of Plant Biology* **13**:343-351.
- Ashraf M, Harris PJC. 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* **51**:163–190.
- Bartoš J, Kopec K, Mydlil V, Peza Z, Rod J. 2000. Pěstování a odbyt zeleniny. Agrospoj, Praha.
- Bashyal J. 2022. Calorimeter – Definition, Types and Uses. *Science Info*. Available from www.scienceinfo.com (accessed on February 2024).
- Battley EH. 1995. The advantages and disadvantages of direct and indirect calorimetry. *Thermochimica Acta* **250**:337-352.
- Boyer JS. 1982. Plant Productivity and Environment. *Science* **218**:443-448.
- Dhyani A, Chopra R, Garg M. 2019. A Review on Nutritional Value, Functional Properties and Pharmacological Application of Perilla (*Perilla Frutescens* L.). *Biomedical & Pharmacology Journal* **12**:649-660.
- Eimil-Fraga C, Proupín-Castiñeiras X, Rodríguez-Añón JA, Rodríguez-Soalleiro R. 2019. Effects of Shoot Size and Genotype on Energy Properties of Poplar Biomass in Short Rotation Crops. *Energies* **12**:20-51.
- Eriksson L, Gustavsson L. 2010. Costs, CO₂-and primary energy balances of forest–fuel recovery systems at different forest productivity. *Biomass Bioenerg* **34**:610-619.
- Florkowski WJ. 2008. Marketing Asian Fruits and Vegetables in Europe. *Acta Hort* **804**:39-44.
- Frigerio A, Gorini V, Verri M. 1986. The zeroth law of thermodynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **137**:573-602.
- Golley FB. 1961. Energy Values of Ecological Materials. *Ecology* **42**:581-584.
- Granier C, Cooksson SJ, Tardieu F, Muller B. 2007. Cell cycle and environmental stresses. Pages 335-355 in Inze D, editor. *Annual Plant Reviews Volume 32: Cell Cycle Control and Plant Development*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford.
- Hák T, Kovanda J, Nondek L, Vačkář D, Weinzettel J. 2015. *Metabolismus společnosti: materiály, energie a ekosystémy*. Karolinum, Praha.
- Hansen LD, Nogales A, Arnholdt-Schmitt B, Neven LG, Barros N. 2018. Biocalorimetry of Plants, Insects and Soil Microorganisms. Pages 336-363 in Wilhelm E, Letcher TM,

- editors. *Ethalpy and Internal Energy: Liquids, Solutions and Vapours*. The Royal Society of Chemistry, London.
- Hari Dass ND. 2013. *The Principle of Thermodynamics*. CRC Press, Boca Raton.
- Hnilička F, Hniličková H, Hejnák V. 2015. Use of combustion methods for calorimetry in the applied physiology of plants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **120**:411-417.
- Hnilička F, Hniličková H, Kudrna J, Kraus K, Kukla J, Kuklová M. 2020. Combustion calorimetry and its application in the assessment of ecosystems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **142**:771-781.
- Hnilička F, Hniličková H, Martinková J. 2010. Využití metod spalné kalorimetrie v biologických disciplínách. Pages 235-255 in Bláha L, Hnilička F, Martinková J, editors. *Současné možnosti fyziologie a zemědělského výzkumu přispět k produkci rostlin (vybrané kapitoly)*. Power Print, Praha.
- Hoagland DR, Arnon DI. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station* **347**:32.
- Hoeber S, Fransson P, Prieto-Ruiz I, Manzoni S, Weih M. 2017. Two *Salix* Genotypes Differ in Productivity and Nitrogen Economy When Grown in Monoculture and Mixture. *Front Plant Sci.* **8**:231.
- Hong JH, Gruda NS. 2020. The Potential of Introduction of Asian Vegetables in Europe. *Horticulturae* **6**:38.
- Hopkins WG, Hüner NPA. 2009. *Introduction to Plant Physiology*, 4th Edition. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Jia XH, Cao HC, Jiang LL, Yuan JH, Zheng SX. 2018. Comparison of heat output and CO₂ respiration to assess soil microbial activity: a case of ultisol soil. *Plant Soil Environ.*, **64**:470–478.
- Kennedy D. 2011. *21st Century Greens: Leaf Vegetables in Nutrition and Sustainable Agriculture*. Leaf for Life, Berea.
- Kim MJ, Moon YY, Tou JC, Mou BQ, Waterland NL. 2016. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* **49**:19-34.
- Korchagina EN. 1998. Present state and trends in the development of combustion calorimetry. *Measurement Techniques* **41**:1057-1064.
- Krstić V. 2022. Theoretical and experimental assessment of a novel method to establish the complete measurement range of the calorimeter and its limit of detection and quantification. *Chinese Journal of Chemical Engineering* **44**:466-473.
- Kumar S, Fandan R, Sachin, Prajjwal. 2023. Hydroponics and Aeroponics: Advancement in Soilles Cultivation. *Recent trends in Agriculture* **10**:99-112.

- Lamprecht I. 1999. Combustion calorimetry. Pages 175-218 in Kemp RB, editor. Handbook of thermal analysis and calorimetry. Vol.4: From Macromolecules to Man. Elsevier, Amsterdam.
- Lavoisier A, De Laplace PS. 1783. Memoir on Heat. *Obesity Research* **2**:189-202.
- Leith H. 1975. Measurement of caloric value. Pages 119-129 in Lieth H, Whittaker R, editors. Primary production of the biosphere. Springer, Berlin.
- Liao Z, Zhou B, Zhu J, Jia H, Fei X. 2023. A critical review of methods, principles and progress for estimating the gross primary productivity of terrestrial ecosystems. *Front. Environ. Sci.* **10**:1093-1095.
- Luxmoore RJ. 1991. A source-sink framework for coupling water, carbon, and nutrient dynamics of vegetation. *Tree Physiol.* **9**:267-280.
- McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* **83**:37-46.
- Meschel SV. 2020. A brief history of heat measurements by calorimetry with emphasis on the thermochemistry of metallic and metal-nonmetal compounds. *Calphad*, **68**:101714.
- Ministerstvo zemědělství. 2023. Situační a výhledová zpráva: Zelenina 2023. Praha.
- Misra MK, 2005, Energy Flow Through Ecosystems. Pages 374-392 in Sahu NC, Choudhury AK, editors. Dimensions of Environmental and Ecological Economics. Universities Press, Hyderabad.
- Mott-Smith M. 1962. The concept of heat and its working simply explained. Dover, New York.
- Ncama K, Aremu OA, Sithole NJ. 2022. Plant Adaptation to Environmental Stress: Drought, Chilling, Heat, and Salinity. Pages 151-179 in Galanakis CM, editor. Environment and Climate-smart Food Production. Springer, Cham.
- Njuguna VW, Cheruiyot EK, Mwonga S, Rono JK. 2018. Effect of genotype and environment on grain quality of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) lines evaluated in Kenya. *Academic Journals* **12**:324-330.
- Odum EP. 1968. Energy Flow in Ecosystems: A Historical Review. *Zoologist* **8**:11-18.
- Paine RT. 1971. The measurement and application of the calorie to ecological problems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **2**:145-164.
- Pearcy RW, Krall JP, Sassenrath-Cole GF. 1996. Photosynthesis in fluctuating light environments. *Advances in Photosynthesis and Respiration* **5**:321-346.
- Perisanu S, Neacsu A, Gheorghe D. 2024. Classification of calorimeters. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis* **13**:100-124.
- Petříková K, et al. 2006. Zelenina: pěstování, ekonomika, prodej. Profi Press, Praha.
- Petříková K, et al. 2012. Zelenina: pěstování, výživa, ochrana a ekonomika. Profi Press, Praha.

- Randhawa MA, Khan AA, Javed MS, Sajid MW. 2015. Green Leafy Vegetables: A Health Promoting Source. Pages 205-220 in Watson RR, editor. Handbook of Fertility: Nutrition, Diet, Lifestyle and Reproductive Health. Elsevier, Amsterdam.
- Regele J, Scholl C, Ulrich M. 2023. History of Microcalorimetry. TA Instruments. Available from www.tainstruments.com (accessed on March 2024).
- Reichle DE. 2019. The Global Cycle and Climate Change, 1st Edition. Elsevier, Amsterdam.
- Rosado-Souza L, Yokoyama R, Sonnewald U, Fernie AR. 2023. Understanding source–sink interactions: Progress in model plants and translational research to crops. *Molecular Plant* **16**:96-121.
- Runge FE, Heger R. 2000. Use of Microcalorimetry in Monitoring Stability Studies. Example: Vitamin A Esters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **48**:47-55.
- Santos MMD, Silva CAD, Oza EF, Gontijo I, Amaral JFTD, Partelli FL. 2021. Concentration of Nutrients in Leaves, Flowers, and Fruits of Genotypes of *Coffea canephora*. *Plants (Basel)* **10**:2661.
- Sarge SM, Höhne GWH, Hemminger WF. 2014. Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications. Wiley-VCH, Weinheim.
- SemenaOnline.cz. 2024. Available from www.semenaonline.cz (accessed on April 2024).
- Shi M, Gu J, Wu H, Rauf A, Emran TB, Khan Z, Mitra S, Aljohani A, Alhumaydhi F, Al-Awthan Y, Bahattab O, Thituvengadam M, Suleria H. 2022. Phytochemicals, Nutrition, Metabolism, Bioavailability, and Health Benefits in Lettuce – A Comprehensive Review. *Antioxidants* **11**:11-58.
- Sonnewald U, Fernie AR. 2018. Next-generation strategies for understanding and influencing source–sink relations in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology* **43**:63-70.
- Smith MR, Rao IM, Merchant A. 2018. Source-Sink Relationship in Crop Plants and Their Influence on Yield Development and Nutritional Quality. *Front. Plant Sci.* **9**:1-10.
- Taiz L, Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*, 3rd Edition. Sinauer Associates Inc, Sunderland.
- Walia H, Wilson C, Ismail AM, Close TJ, Cui X. 2019. Comparing genomic expression patterns across plant species reveals highly diverged transcriptional dynamics in response to salt stress. *BMC Genomics* **10**:398.
- White AC, Rogers A, Rees M, Osborne CP. 2016. How can we make plants grow faster? A source–sink perspective on growth rate. *Journal of Experimental Botany* **67**:31-45.
- Wiedemann HG, Felder-Casagrande S. 1998. Thermomicroscopy. Pages 472-496 in Brown ME, editor. Handbook of thermal analysis and calorimetry. Vol.1: Principles and Practice. Elsevier, Amsterdam.
- ZeSemen.cz. 2024. Available from: www.zesemen.cz (accessed on April 2024).