

Vliv míry využitelnosti fosforu na kvalitu potravin a krmiv, zatížení životního prostředí a zdraví konzumentů

(The influence of the degree of phosphorus utilization on the quality of food and feed, the health of consumers and the environmental impact)

Kateřina Vaculová, Irena Sedláčková
Agrotest fyto, s.r.o., Havlíčkova 2787, Kroměříž

Souhrn: Obiloviny jsou z hlediska pěstební plochy i produkce zrna vedoucí skupinou plodin, která celosvětově zabezpečuje dominantní podíl surovin pro lidskou výživu i výživu hospodářských zvířat. Jsou důležitým zdrojem sacharidů, bílkovin, lipidů, vitamínů, vlákniny, základních minerálů a mikroživin. Plnou využitelnost a biologickou dostupnost minerálů a dalších složek zrna snižuje přítomnost některých antinutričních látek, z nichž je na prvním místě kyselina fytová (*myo*-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakisfosfát). Kyselina fytová (PA), hlavní zásobní forma fosforu, tvoří 65%–90% z celkového fosforu, obsaženého v zrně. S kationty kovů vytváří nerozpustné soli (fytáty) a tím je činí obtížně stravitelnými pro lidi a monogastrická zvířata. Antinutriční účinek fytátů je považován za kritický hlavně pro biologickou dostupnost železa a zinku, zejména z hlediska globálního deficitu těchto mikroživin v lidské stravě, a s tím související mikromineralní podvýživou se závažnými zdravotními důsledky. Článek pojednává o vlivu PA a fytátů na výživu lidí a hospodářských zvířat, nepříznivých důsledcích pro životní prostředí a negativních i pozitivních aspektech konzumace PA na zdraví lidí.

Klíčová slova: obiloviny, kyselina fytová, mikroprvky, výživa a zdraví lidí a zvířat

Abstract: Cereals are the leading group of crops worldwide in terms of both cultivated area and production of grain, which provide the dominant share of raw materials for human food as well as livestock nutrition. They are an important source of carbohydrates, proteins, lipids, vitamins, dietary fibre, essential minerals and micronutrients. Full utility and bioaccessibility of the minerals and other grain components are reduced by the presence of some antinutritional substances, of which phytic acid (*myo*-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakisphosphate – InsP6) is in the first place. Phytic acid (PA), the main storage form of phosphorus, constitutes 65%–90% of the total phosphorus contained in the grain. Due to the strong negative charge PA attracts and chelates metal cations, resulting in mixed insoluble salts (phytates), thus rendering them almost indigestible to humans and non-ruminants (poultry, swine, and fish). The anti-nutritional effect of phytate is considered critical especially for the bioavailability of Fe and Zn, mainly from the point of view of the global deficit of these micronutrients in the human diet, and the related micromineral malnutrition with serious health consequences. The article discusses the influence of PA and phytate in human and livestock nutrition, the unfavorable environmental impacts and the negative and positive aspects of PA consumption on the health of people.

Key Words: cereals, phytic acid, mikroelements, human and animal nutrition and health

Úvod

Růst, vývoj, obnova buněk, tkání a orgánů, energie i fyzická kondice lidí a zvířat je významně ovlivněna výživou, tedy kvalitou konzumované potravy anebo krmiva. Kromě základních tzv. makroživin (sacharidy, bílkoviny a tuky), které poskytují organismu „stavební materiál“ a energii, mají na kvalitu výživy vliv mikroživiny (minerální látky a vitaminy) a také další látky, které sice nejsou esenciální, ale jejich konzumace v rámci vyvážené diety vykazuje průkazné zdravotní benefity (podpora dobrého zdravotního stavu, prevence civilizačních chorob, zvýšení imunity nepříznivým biotickým a abiotickým faktorům, modulače metabolických procesů, aj.). Patří k nim například fytochemikálie s bioaktivní účinností (polyfenolické látky, karotenoidy, fytosteroly, peptidy, fytáty, atd.), vláknina a další nestravitelné materiály (Astley and Finglas 2016).

Nedostatek nebo nadbytek esenciálních živin i bioaktivních látek se negativně projevuje na všech životních funkcích a nesprávná výživa tak významně ovlivňuje vzájemné vztahy mezi přijímanou stravou, zdravím a nemocemi. Jedním ze široce evidovaných problémů, souvisejících s kvalitou přijímané potravy, je problematika nevyvážené výživy nebo podvýživy. Chronický nedostatek základních vitamínů a minerálů ve stravě, který je zvláště rozšířeným problémem v nízkopříjmových zemích, se označuje také jako skrytý hlad neboli „hidden hunger“ (Muthayya et al. 2013). S podvýživou, v souvislosti s nedostatkem některých mikroživin zejména minerálních látek, se setkáváme nejen

v nízkopříjmových, ale i v rozvinutých zemích (např. Nielsen et al. 2013). Tato forma podvýživy patří k malnutricím uváděným v souvislosti chudobou, vyšší socioekonomického statusu, zemědělskou produktivitou a obecně potravinovou bezpečností. Avšak v současnosti je nutné do tohoto výčtu zahrnout také další faktory. Paradoxně se na vzestupu počtu případů deficiencie mikroživin mohou podílet i zdánlivě pozitivní vlivy jako je stále aktivnější způsob života obyvatel, rozdílná dostupnost určitých skupin potravin, nové intenzivnější způsoby zpracování surovin, vysoká koncentrace obyvatel, nové nebo módní výživové směry, apod. V souhrnu globální zátěž podvýživou přináší dlouhodobé vývojové, ekonomické, sociální a lékařské důsledky jednotlivcům, komunitám a zemím (Kumar et al. 2022).

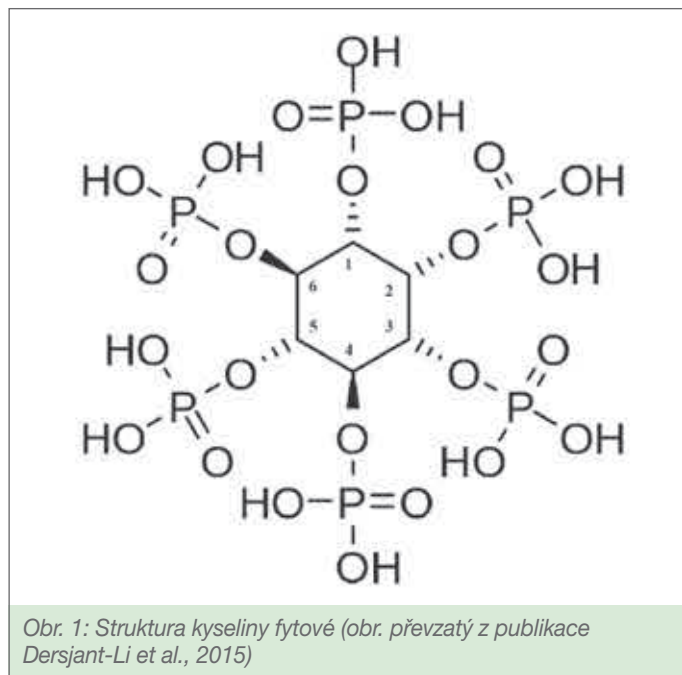
Podle dostupných údajů (Gupta et al. 2015) je více jako polovina světové populace ohrožena nedostatkem mikroživin, u více než 340 milionů lidí je evidován nedostatek jedné nebo více mikroživin, včetně nedostatku vitamínu A, železa, jódu a zinku (UNICEF, 2021) a třetina populace trpí v důsledku anemie z nedostatku železa (Fe) a deficiencí zinku (Zn). Nedostatek Fe je jednou ze čtyř nejčastěji se vyskytujících forem podvýživy (Stephenson et al. 2000). Zhruba dvě miliardy lidí na světě nepřijímají ve své stravě dostatek Fe (Zimmermann et al. 2007), přičemž se tento stav neomezuje jen na chudé země. Podle údajů WHO (2021) je 42% dětí mladších 5 let a 40% těhotných žen anemických. Kromě dětí a žen v produktivním věku, hlavně těhotných, jsou anemií postiženi také senioři (De Benoist et al. 2008, Russel 2021). U dětí je nedostatek Fe spojen s nízkou

porodní váhou, celkově nepříznivě ovlivňuje kognitivní a fyzický vývoj, vede k spinálním defektům a poškození mozku (Young 2018). U dospělých významně snižuje výkonnost a produktivitu práce. Deficience obou stopových prvků (Fe a Zn) se u těhotných žen odráží na nepříznivém vývoji plodu i nízké odolnosti vůči infekcím. Zinek má navíc vliv na buněčný růst a diferenciaci a jeho nedostatek způsobuje abnormální neurobehaviorální vývoj, zvýšenou nemocnost a mortalitu (Gupta et al. 2015).

Kyselina fytová, fytáty a volný fosfátový fosfor v rostlinných surovinách

Pravidelný a dostatečný příjem minerálních látek (zejména stopových prvků – Fe, Zn, manganu - Mn a mědi - Cu, ale i makroprvků – vápníku - Ca, hořčíku - Mg, fosforu - P a dalších) úzce souvisí nejen se skladbou potravy nebo krmiva, ale s mnoha dalšími faktory, od obsahu jednotlivých prvků, přes jejich stravitelnost a využitelnost v organismu, až po použité technologie zpracování (Suliburska and Krejpcio 2014). Bohatým zdrojem širokého spektra minerálních látek jsou rostlinné suroviny, avšak biologická využitelnost minerálů je často limitována přítomností antinutričních látek, které se v rostlinách nacházejí, jako jsou taniny, polyfenolické sloučeniny, vláknina, fytáty, šřavelan vápenatý nebo inhibitory proteáz a další (Kalač and Mika 1997, Arnarson 2017, Foster et al. 2012, aj.).

Fosfor je klíčový prvek nezbytný pro biologické funkce, růst a vývoj všech živých organismů. Primárně je součástí organických molekul – nukleových kyselin (DNA a RNA), fosfolipidů buněčných membrán, energetických přenašečů (ADP, ATP) a účastní se většiny významných metabolických procesů. Fosfor tvoří asi 0,2% sušiny rostlin. U obilovin, luskovin, olejnin a ořechů je hlavní zásobní formou P kyselina fytová (Obr. 1 - *myo*-inositol-1,2,3,4,5,6-hexakis-dihydrogenfosforečná kyselina, zkráceně InsP_6 , $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{O}_{24}\text{P}_6$), která tvoří 1–7% hmotnosti jejich sušiny (Zhou et al. 1995).



Tato záporně nabitá molekula je syntetizována složitou, enzymaticky řízenou biochemickou cestou z glukózy přes nižší inositolfosfáty (Raboy 2001 a, 2001 b, Vlčko 2013, aj.).

Biosyntéza kyseliny fytové začíná přeměnou glukózo-6-fosfátu na inositol-3-fosfát (InsP3) působením enzymu 1-L-*myo*-inositolfosfát syntázy (MIPS). Z InsP3 může syntéza pokračovat k fytátu dvěma cestami: fosfatidylinositolovou cestou, závislou na lipidech a cestou nezávislou na lipidech (Madsen and Brinch-Pedersen 2020). Současné poznatky o genech, které kódují enzymy, fungující v různých fázích syntézy PA, od první fosforylace *myo*-inositolu po transport PA do rezervních tkání semen jsou dostupné například v revii autorů Silva et al. (2021).

Kyselina fytová se hojně vyskytuje jako všudypřítomná složka eukaryotických buněk. Zde kromě hospodaření s fosfátem, *myo*-inositem a minerály v rostlinných orgánech a tkáních a účasti na celé řadě metabolických procesů slouží jako hlavní metabolický pool ve fosfátových a pyrofosfátových signalizačních a regulačních drahách a má rovněž důležitou roli v buněčném metabolismu včetně exportu mRNA, opravy DNA, regulace struktury chromatinu a apoptózy programované buněčné smrti (Raboy 2003, Agarwal et al. 2009, Doria 2009). Známa je také funkce PA v ochraně proti stresu, biosyntéze buněčných stěn a hormonální homeostázi (Croze and Soulage 2013).

Kyselina fytová má silnou schopnost chelátovat vícemocné kovové ionty a vytvářet s nimi komplexní soli (Raboy 2003, Raboy 2020, aj.), obecně nazývané fytáty, které jsou špatně nebo téměř nerozpustné, což redukuje jejich biologickou dostupnost a nutriční využitelnost pro lidi, monogastrická zvířata a ryby (Bohn et al. 2008, Brouns 2022, aj.). V některých případech může PA tvořit také vazby s proteiny a škroby (Angel et al. 2002, El-Hack et al. 2018). Nižší inositolfosfáty se také účastní stresových reakcí, membránové biogeneze a intracelulární signalizace (Storcksdieck et al. 2007, Loewus and Murthy 2000).

Fytát jako minerální vázaná sůl PA je důležitou minerální rezervou v semenech, kde je uložen v proteinových zásobních vakuolách ve vrstvě aleuronových buněk nebo embrya semene, ze kterých se, v důsledku aktivity enzymu fytázy, uvolňuje při klíčení. Údaje o množství fytátového P v rostlinách jsou často velmi variabilní a závisí na jednotlivých odrůdách, ročníkových diferencích, rozdílech v podmínkách pěstování a použité agrotechnice, technice sklízně, metodách skladování i analytických postupech (Steiner et al. 2007, Dai et al. 2007, Morgounov et al. 2007, Vaculová et al. 2012, aj.). V podobě PA a jejich solí je v semenech obilovin a luskovin vázáno 65–90% celkového P (Bohn et al. 2008, Raboy 2020) a obsah PA v sušině dosahuje u obilovin od 0,5 do 2,0% (Coulibaly et al. 2011).

V zrně může být obsah PA dokonce až 1000 krát vyšší než ve vegetativních pletivech, tedy kořenech, stoncích a hlízách (Cominelli et al. 2020). Fytáty se vytvářejí již po opylení a hromadí se během zrání zrna. U obilovin a dalších rostlinných semen se vyskytují zejména v aleuronové vrstvě (téměř 80%), kde vytváří specifické kulovité krystaloidní inkluze, tzv. globoidy, které jsou uloženy ve vakuolách skladujících proteiny (Otáhalová 2015). Obsah fytátů, P a celkově minerálů (Tab. 1) je mnohem vyšší v otrubách než v celém zrně (Guttieri et al., 2003; Steiner et al., 2007).

V zrně ječmene je v perikarpu a aleuronové vrstvě 10 až 20 krát více PA než v endospermu. V aleuronové vrstvě pšenice se nachází 85% obsahu PA, v embryu 13% a endosperm obsahuje pouze 2%, zatímco u rýže a kukuřice je v perikarpu a embryu koncentrováno až 80% PA. U luskovin se fytáty kumulují převážně v bílkovinných granulích v endospermu (až 90% – Coulibaly et al. 2011, Gupta et al. 2015, Zittermann 2003). Globoidy byly nalezeny také u rostlin například z čeledi brukvovité, lilkovité a dalších (Bohn et al. 2008).

Tab. 1: Koncentrace fytátového fosforu (g/kg, EFSA, 2014) a vybraných mikroprvků (mg/kg) v rostlinných produktech

Produkt	N ¹⁾	Fytátový P	Fe		Zn		Mn		Cu	
		průměr	průměr	SD ¹⁾	průměr	SD	průměr	SD	průměr	SD
Ječmen	51	2,2	36	5	25,6	3,1	14,9	1,9	5,2	0,9
Pšenice	54	2,4	40	10	26,6	4,1	31,9	6,4	3,8	0,9
Tritikale	25	2,8	44	30	32,1	3,2	30,4	7,9	5,3	0,7
Oves	20	2,3	89	81	26,9	3,9	41,7	10,5	3,7	0,5
Kukuřice	46	1,9	19	2	18,2	1,2	4	1,7	1,8	0,8
Proso	13	1,9	48	6	30,9	2,4	11,8	3,6	8,9	1,6
Čirok	19	1,8	35	8	20,3	3,9	15,1	3,9	4,9	1,6
Bob koňský	5	3,1	59	20	47,2	3,6	11,4	1,8	15,1	1,2
Lupina bílá	5	3	33	9	38,3	2,5	555,9	228,3	7,6	1,2
Lupina úzkolistá	5	3	39	8	32,6	1,6	40,2	18,9	4,8	0,7
Pšeničné otruby jemné	8	6,7	132	9	122,8	15,5	151,5	13,9	14,5	2,5
Pšeničná krmná mouka	6	3,7	52	13	40	11,2	35,2	12,8	6,9	2,2
Pšeničné otruby hrubé	11	9,7	152	23	103,6	12,7	148,5	18,8	14,4	2
Bob koňský	5	3,1	59	20	47,2	3,6	11,4	1,8	15,1	1,2
Řepkový šrot	9	6,6	146	11	65,5	3,5	71,1	4,2	6,2	1,4
Řepkové pokrutiny	10	6,4	144	31	60,9	2,5	65	4,5	5,6	1,1
Sojová mouka	14	3,6	187	51	52,2	3,4	34,9	3,9	13,2	2,2
Sojové pokrutiny	10	3,8	263	90	55,2	2	40,8	6,3	16,1	2,4
Lněné pokrutiny	10	4,2	240	116	70,7	11	45	6,4	20,8	3,2

¹⁾ – N = počet analýz; SD = směrodatná odchylka

Upraveno z publikace Nys et al. (2018), podklady Schlegel (nepublikované údaje)

Fytáty v krmivech pro hospodářská zvířata a jejich vliv na životní prostředí

Změny v systémech chovu, způsobené koncentrací ustájení vysokoprodukčních hospodářských zvířat, nastolily řadu problémů a otázek, které v předchozích staletích nemusely být řešeny. Jednou z nich je například výroba optimálně sestavených krmiv pro jednotlivé kategorie zvířat. Nedostatek potřebných minerálů a zejména mikroživin, které je nutné doplňovat při sestavování krmných směsí, je jedním z následků přechodu výživy zvířat z krmiv bohatých na mikroživiny k obilovinám, sóje a dalším vysokoenergetickým rostlinným krmivům (Cordain 1999), kde je téměř veškerá PA přítomna v podobě smíšených fytátových solí (fytin). Využití krmiv bohatých na fytáty je rozdílné u jednotlivých kategorií hospodářských zvířat.

Zatímco přežvýkavci jsou v důsledku přítomnosti fytázy v batoru schopni strávit zhruba 2/3 fytátů z krmiva, monogastrická zvířata mají v gastrointestinálním traktu nedostatek enzymů degradujících fytáty a proto je pro tuto skupinu fytátový P, přijímaný z rostlinných zdrojů, téměř zcela nedostupný (Van Krimpen et al. 2013). V posledních letech se ale ukazuje, že i u přežvýkavců může být fytát obsažený v krmivech určitým problémem. V literatuře se setkáváme s údaji, že v případě vysokoprodukčních diet, založených na energeticky bohatých krmivech (obiloviny a olejnata semena), se úměrně zvyšuje množství dietního fytátového P, který nejsou ani přežvýkavci schopni plně využít (Leytem et al. 2007).

Procento stravitelného fytátu kolísá nejen v důsledku přítomnosti enzymů, ale také v závislosti na struktuře fytátových globoidů, jejich velikosti a místa výskytu v rostlinných pletivech, na pH, obsahu prvků a dalších faktorech (Rada and Havlík

2010). Míru stravitelnosti fytátu proto ovlivňuje i výchozí surovina použitá pro přípravu krmiva.

Kromě toho, že ve fytátech je imobilizována řada mikroprvků, neselektivně se váží také na bílkoviny a inhibují enzymy včetně trypsinu a α -amylázy, čímž snižují využitelnost a stravitelnost bílkovin i škrobu pro zvířata (Lee et al. 2006, Kumar et al. 2010, Dersajant-Li et al. 2015, Kumar et al., 2020). Kyselina fytová je schopna vázat bílkoviny v širokém spektru pH hodnot. Při acidických hodnotách pH (např. v žaludku) se PA váže na bazické aminokyseliny (arginin, histidin a lysin) a vytváří komplexy bílkovina-fytát. V tenkém střevu, při pH vyšším než isoelektrický bod bílkovin, váže proteiny prostřednictvím kationů a vytváří komplexy bílkovina-minerál-fytát (Cheryan and Rackis 1980, Kies et al. 2006).

Celkově může PA vést ke snížení stravitelnosti živin i tím, že v interakci s endogenními enzymy zvyšuje odolnost proteinů vázaných na fytát vůči trávení pepsinem. Potřeba zvýšené sekrece trávicích enzymů a snížené reabsorpce aminokyselin v tenkém střevu pak přispívá ke zvýšení ztrát u endogenních aminokyselin nebo zhoršené využitelnosti saturovaných mastných kyselin (Cowieson et al 2008, Woyengo and Nyachoti 2013, Zaefarian et al. 2013). V chovech hospodářských zvířat je proto nepříznivé působení PA a fytátů evidováno nejen ve sníženém využití živin, ale vede i ke zvýšeným nákladům na udržení základních životních funkcí a energie a tím ke snížení dostupnosti energie pro produkci.

Globálním problémem je negativní vliv P na znečištění životního prostředí. Z krmiv rostlinného původu jsou hospodářská zvířata schopna strávit cca 30–40 % P. Zbytek P zůstává vázán v komplexech s PA, tedy pro zvířata v nepřístupné formě (Sharma et al. 2013), a proto se musí anorganický P do krmiv přidávat (Rada and Havlík 2010).

Vzhledem k potřebě a využití P ve výživě zvířat je zřejmé, že se stále velký podíl nevyužitého P dostává do půdy a povrchových vod. Degradace životního prostředí přebytkem živin se tak stává stále aktuálnější problémem, také v souvislosti se snižováním obsahu dostupné vody v půdě v důsledku nastupujících klimatických změn. Nevyužitý P v krmivech pro hospodářská zvířata, vázaný v podobě PA a fytátů, se s exkrementy dostává do kejdy, kde se z nich působením mikrobiálního rozkladu uvolňují fosfáty, hlavní zdroj eutrofizace povrchových vod a nežádoucí zátěže i pro půdu (Jongbloed and Lenis 1998).

Půdní P tvoří organické a anorganické formy P, z nichž je cca 80 % nepohyblivých, a nejsou proto pro rostliny snadno dostupné (Menezes Blackburn et al. 2013). Organická frakce půdního P, která se skládá z odumřelých rostlinných a živočišných zbytků, tvoří 30–65 % celkového půdního P (Lu et al. 2020). Tato forma P není biologicky dostupná (Wang et al. 2021), pokud není mineralizována na kyselinu fosforečnou. V souvislosti s intenzifikací rostlinné výroby se zvyšuje potřeba dostupného P pro plodiny, který je tak nezbytné dodávat v podobě minerálních hnojiv. Tyto přístupy vedou ke stálému snižování světových zásob minerálního P a současně, v případě neúplného využití minerálních hnojiv, dále zvyšují podíl nevyužitého P v půdách a vodách (Reddy et al. 2017, aj.).

V oblastech s intenzivní živočišnou výrobou nejsou environmentálními riziky jen přebytky dusíku a fosforu z hnojiv, ale i dalších prvků vyloučených z exkrementů hospodářských zvířat, přidávaných ve formě stopových minerálů do krmiv. Jejich akumulace v půdě může působit toxicky na rostliny a mikroorganismy a podpořit vývoj nepříznivých patogenů v půdě a vodních tocích (Coppenet et al. 1993). Podle údajů Fageria et al. (2008) má v současnosti nejméně 60 % orné půdy ve světě nedostatek minerálů nebo problémy s toxickými prvky. Příkladem mohou být nežádoucí následky suplementace racionů drůbeže stopovými prvky (Zn a Cu). Jak uvádějí Nys et al. (2018), za posledních 20 let hnojení drůbežím trusem se do půdy dostalo mimořádné množství těchto mikroživin. Porovnání dodávek tohoto množství s požadavky na optimální růst rostlin ukazuje, že průměrné hodnoty byly překročeny o více než 500 % (Tab. 2).

Antinutriční účinky fytátů v krmivech pro hospodářská zvířata mohou být redukovány zkrmováním plodin s geneticky sníženým obsahem PA a zvýšeným obsahem anorganického P (Raboy 2020), případně vyšší aktivitou endogenní fytázy nebo postupy, zaměřenými na snížení obsahu fytátů využitím různých způsobů zpracování zrna, ale zejména aplikací enzymu fytázy.

Fytáza, myo-inositol hexakis fosfát fosfohydroláza (EC. 3.1.3.8), katalyzuje hydrolýzu kyseliny fytové na nižší inositolfosfáty a volnou kyselinu fosforečnou. Fytázy se člení podle více kritérií, základní dělení je podle počáteční pozice hydrolýzy fytátů a podle katalytického mechanismu (popis viz např. Vlčko 2013). Působením fytázy se zlepšuje nejen stravitelnost a využitelnost fosforu, ale i využitelnost dalších vázaných prvků (Ca, Fe, Zn), aminokyselin i energie (Madsen and Brinch-Pedersen 2019).

V souhrnu se využití fytáz, zejména u monogastrických hospodářských zvířat, projeví ve snížení nákladů, zlepšení

Tab. 2: Porovnání obsahu minerálních látek v drůbežím trusu, aplikovaném dle EU legislativy (v množství 170 kg/ha/rok) a průměrné spotřeby pro růst rostlin

Minerální prvek	Dodáno ¹⁾ v podobě drůbežního trusu (kg minerálních látek/ha/rok)	Odebráno plodinami (kg minerálních látek / ha/rok)	Přebytek (%)
Dusík (N)	170	170	0
Fosfor (P)	78	35	123
Zinek (Zn)	2,32	0,2	1060
Měď (Cu)	0,306	0,06	410

¹⁾ Vypočteno z bilance mezi příjmem (spotřeba krmiva a minerální složení diety) a výdejem (výdej zvířat a minerální složení těla)

Upraveno z publikace Nys et al. (2018)

ekonomiky chovu, zdravotního stavu a plodnosti zvířat a současně dochází k redukci množství P, vylučovaného v jejich exkrementech (Kalač and Míka 1997, Abid et al. 2017, Balaban et al. 2017, Dersajant-Li et al. 2015, Dal Yang et al. 2014, Pousen et al. 2019, Madsen and Brinch-Pedersen 2019, Raboy 2020 aj.). Na rozdíl od monogastrických hospodářských zvířat jsou metody využití fytázy u ryb zatím nejednotné z důvodu rozdílů v trávicích soustavě ryb, a proto se liší druh od druhu (Kumar et al. 2012).

První komerčně vyráběné fytázy se objevily na trhu již v roce 1991 (Dersajant-Li et al. 2015), avšak jejich využívání bylo, vzhledem k vysokým cenám, zpočátku omezené. Ke zvýšení zájmu o využití fytázy vedly nejen požadavky na zlepšení efektivnosti a ekonomiky chovu, využití živin a biologické dostupnosti makro- a mikroprvků, ale především zlevnění její výroby a potřeba řešení negativního vlivu živočišné produkce na životní prostředí (Nagashima et al. 1999, Kumar et al. 2012, aj.).

V krmivech pro hospodářská zvířata jsou aplikovány různé, zejména mikrobiální fytázy, které mají širší spektrum optimálních hodnot pH (pH = 2–6) než fytázy rostlinné s pH optimem kolem hodnoty 5 (Wodzinski and Ullah 1996, Angel et al. 2002). Madsen and Brinch-Pedersen (2019) uvádějí, že v současnosti jsou ve výživě zvířat jako aditiva využívány pouze mikrobiální enzymy, zařazené do třídy kyselých fytáz (HAP - histidine acid phosphatase, EC 3.1.3.2). Na aktivitu fytázy *in vivo* může mít vliv mnoho faktorů, včetně faktorů souvisejících s fytázou, jako je optimální rozmezí pH, typ fytázy a rezistence vůči proteáze. Faktory související se zvířaty zahrnují druh, věk zvířat a retenční čas. Velmi důležité jsou faktory související se složením krmiva, jako je obsah fytátů, hladiny Ca a složení přísad i způsoby přípravy krmiva (Adeola and Cowieson 2011, Awad et al. 2013). Například fermentace krmiva před krmením prodlužuje dobu pro degradaci PA a nižších inositolfosfátů, což má ve výsledku významný vliv, neboť degradace nižších inositolfosfátů je rychlá a téměř úplná (Blaabjerg et al. 2011). Také používané krmné suroviny vykazují rozdílnou endogenní fytázovou aktivitu (Tab. 3), a to se může projevit ve směsích s odlišným podílem jednotlivých komponent.

Dobrymi přírodními zdroji enzymu fytázy jsou obiloviny čeledi *Poaceae*, tribu *Triticae*, kde nejvyšší aktivitu vykazovalo žito, následovala pšenice, tritikale a ječmen. Naproti tomu oves a kukuřice se společně s luštěninami řadily do skupiny s nejnižší aktivitou (Steiner et al. 2007, Madsen and Brinch-Pedersen 2019). U pšenice byla nejvyšší aktivita tohoto enzymu

Tab. 3: Obsah celkového fosforu, fytátu a endogenní fytázové aktivity u vybraných krmných surovin

Krmná surovina	Celkový P (g.kg ⁻¹)	Fytátový P (g.kg ⁻¹)	Podíl fytátového P /celkový P (%)	Fytáza (FTU kg ⁻¹) ³⁾
Kukuřice	2,4–2,62	1,7–2,05	72–85,4	24–25
Sojové pokrutiny	6,49–6,66	3,88–4,53	60–68	10–95
Plnotučné sójové boby	5,55	3,08	55,5	40
Pšenice	2,0–3,08	1,6–2,2	72–80	255–840
Ječmen	2,6–3,21	1,69–1,96	61–67	130–595
Řepkové pokrutiny ¹⁾	8,76–9,72	6,45–7,4	66–76,4	5–35
Řepkové pokrutiny ²⁾	11,8	7	59	—
Pšeničné otruby	10,96	8,36	76,3	1700–3090
Pšeničné krupičné otruby	8,45	7,8	92	2500
Slunečnicové pokrutiny	9,05	7,48–7,7	82,8–85	<10

¹⁾ – s nízkým obsahem glukosinolátů; ²⁾ – s vysokým obsahem glukosinolátů

³⁾ – aktivita fytázy v FTU = množství fytázy, které uvolní za 1 minutu z fytátu sodného 1 mmol anorganického fosfátu při pH 5.5 a teplotě 37 °C.

Upraveno z publikace Dersjant-Li et al. (2015)

zaznamenána v aleuronové vrstvě (více než 40 % celkové aktivity), přibližně 34 % bylo stanoveno v endospermu, 15 % ve štítku a 3 % v zárodku. Produkty získané mletím obilovin měly různou aktivitu fytázy, celkový obsah P i koncentraci fytátového P, nejvyšší hodnoty byly naměřeny v obalových vrstvách zrna (Steiner et al. 2007). V žitných otrubách byla zjištěna 10–20 krát vyšší aktivita fytázy než v žitné mouce. Účinnost fytáz z rostlin je velice variabilní a snadno ovlivnitelná mnoha faktory jako je druh, odrůda, stáří suroviny, způsob nebo podmínky skladování (Steiner et al. 2007, Sing 2008).

Vliv forem fosforu na zdravotní stav lidí

Ze statistických přehledů vyplývá, že počet rostlinných druhů, které se podílejí na výživě lidí, je v současnosti velmi omezený. Přesto, že ve světě existuje více jako 195 000 kvetoucích rostlin, které by mohly sloužit pro výživu lidí, v současnosti se ve větší míře využívá méně než 300 druhů. Z nich jen 17 druhů zajišťuje zhruba 90 % potravin, přičemž nejvyšší podíl patří obilovinám. Osm druhů obilovin - pšenice, kukuřice, rýže, ječmen, čirok, oves, žito a proso poskytuje více jako 56 % energie a 50 % bílkovin z celosvětové spotřeby potravin (Stoskopf 1985). V této souvislosti je nutné zdůraznit, že i když je zvyšující se produkce obilovin spojována prakticky s každou vysoce rozvinutou civilizací v historii lidstva, jsou obiloviny současně „dvousečnou zbraní“, která lidstvo ohrožuje. Obilí jako základní potravina pro výživu lidí totiž představuje dramatický odklon od potravin, na které se člověk jako druh geneticky adaptoval za posledních 40 000 let svého vývoje (Cordain 1999) a tento nesoulad mezi geneticky podmíněnými stravovacími potřebami lidstva a jeho dnešní stravou je zodpovědný za mnoho civilizačních chorob, se kterými se lidstvo v současnosti potýká (Eaton and Konner 1985). Podíl zemědělské výroby na aktuálním zdravotním stavu lidí komentují Garg et al. (2018) slovy: „Náš zemědělský systém dosud nebyl navržen tak, aby podporoval lidské zdraví; místo toho se zaměřuje pouze na zvýšení výnosu obilí a produktivity plodin“.

Na současné úrovni výživy lidí se bezesporu podílejí také faktory související s celkovým hospodářským vývojem. Jak již bylo zmíněno v úvodu, podvýživa je stavem, který ohrožuje nejen nízkopříjmové skupiny obyvatel, ale paradoxně

i obyvatele hospodářsky vysoce vyspělých států. Na rozdíl od výživy hospodářských zvířat, které se v posledních letech věnuje čím dál, tím větší pozornost, výživa lidí není procesem, na který by někdo systematicky dohlížel a řídil jej. Jsou sice vypracována odborná výživová doporučení ke správné a preventivní výživě, jedná se ale jen o rámcové návody, které navíc nejsou závazné. Orientaci spotřebitelů významně ovlivňuje reklama, informace z internetu, různé nové nebo módní výživové směry, které často s nutričně vyváženou výživou nemají nic společného. Stále aktivnější způsob života vede k nárůstu poptávky po potravinářských výrobcích připravených moderními a intenzivnějšími technologickými postupy, které se mohou odrazit na využitelnosti nejen základních skupin makroživin, ale především nutričně významných fytochemikálií s bioaktivní účinností. Také alternativní výživové směry, které se od „konvenční výživy“ odlišují vyloučením některých druhů běžných potravin, spočívají v odlišném způsobu přípravy pokrmů a výběru potravin, v neobvyklém rozložení stravy během dne či v nezvyklé kombinaci potravin, se někdy podepisují na nezáměrném negativním vlivu stravy na zdravotní stav konzumentů, hlavně u dětí adolescentů, těhotných a kojících žen, sportovců a osob s různými nemocemi (Hejmalová and Hrnčířková 2012). Jednostraná orientace na určité skupiny nebo druhy potravin zase často souvisí s cenovou politikou, rozdíly v ekonomické situaci spotřebitelů i místem jejich pobytu (vesnice vs. velká města).

V souvislosti s diskutovanou problematikou, tedy využitelností, biodostupností a účinky různých forem P je nezbytné zdůraznit protichůdnou roli těchto sloučenin ve vztahu ke zdravotnímu stavu lidí. Negativní antinutriční účinek PA a jejich solí v lidské stravě, založené na dominantním podílu rostlinných surovin (hlavně obilovin a luskovin), se projevuje zejména ve dvou oblastech. První je již zmíněná podvýživa v důsledku nedostatku důležitých minerálních látek (zejména Fe, Zn a dalších prvků) a s ní související všechny zdravotní následky. Lidé, obdobně jako monogastriční hospodářská zvířata, nemají dostatečnou endogenní aktivitu enzymu fytázy, aby byli schopni plně využít P a minerální látky vázané ve formě fytátů, a proto jsou pro ně tyto sloučeniny nutričně nevyužitelné. Průměrný denní příjem PA u obyvatel z rozvojových zemí, kteří konzumovali převážně vegetariánskou stravu, byl 2000–2600 mg, zatímco populace,

jejíž strava byla smíšená, konzumovala denně jen kolem 15–1400 mg (Reddy, 2001). Druhou oblastí nepříznivého účinku PA je její inhibiční působení na bílkoviny a sacharidy. Bylo zjištěno, že PA inhibuje různé proteázy, enzymy nezbytné pro degradaci bílkovin a jejich následné trávení v žaludku a tenkém střevu (Kumar et al. 2010, 2021), a rovněž ovlivňuje absorpci sacharidů (Lee et al. 2006, Greiner and Konietzny 2006), což redukuje využitelnost těchto živin.

Navzdory prokázanému antinutričnímu působení má ale PA řadu pozitivních zdravotních a fyziologických výhod, souvisejících s její strukturou a chemickými vlastnostmi, a to jak v prevenci, tak i v léčbě různých onemocnění (Oatway et al. 2001, Bloot et al. 2021, Abdulwaliyu et al. 2019). Důležitá je především vysoká antioxidační aktivita, kladný zdravotní vliv má také inhibiční schopnost a afinita PA k některým minerálům, například Fe^{3+} , Zn^{2+} nebo Ca^{2+} (Minihane and Rimbach 2002, Chukwuma et al. 2016, Fuster et al. 2017, D'Alessandro et al. 2019, aj.). V poslední době jsou inositolfosfáty, zejména PA a myo-inositol a jejich biologická aktivita v popředí zájmu díky pozitivním výsledkům v mnohých zdravotních a farmaceutických výzkumech (Chatree et al. 2020, Rážová 2016, Narayanayswamy and Norhaizan 2018, aj.), které prokazují antikarcinogenní, antioxidační, antidiabetické, hypolipidemické, antiangiogenní, imunomodulační a další aktivity těchto sloučenin.

Mnoho prací se zaměřuje na vliv PA při potlačení oxidačního stresu (např. Fardet et al. 2008), který je považován za jeden z hlavních faktorů rozvoje život ohrožujících civilizačních chorob, jako jsou neurodegenerativní a kardiovaskulární onemocnění, rakovina, atd. Antioxidační aktivita PA se projevuje snížením hladiny volných radikálů a peroxidace lipidů, spojené s přítomností Fe (Minihane and Rimbach 2002, Bohn et al. 2008). Hlavní příčiny, možné protektivní a léčebné účinky PA u Alzheimerovy a Parkinsonovy choroby, hypolipidémie, různých typů rakoviny (kolorektální, prostaty, jater, prsu, kůže, rhabdomyosarkomu) i v terapii onemocnění HIV virem jsou diskutovány v review autorů Abdulwaliyu et al. (2019). V práci Narayanayswamy and Norhaizan (2018) jsou doplněny ještě další farmakologické aktivity PA, například antibakteriální, antiangiogenní, antiulcerózní, karyostatická, hemolytická, hypoalergenní, imunomodulační, neuroprotektivní, apod. a rovněž možnosti jejího využití při inhibici nežádoucí aktivity klíčových enzymů různých onemocnění. Protirakovinné působení je dokumentováno v řadě dalších studií, které prokazují, že PA snižuje buněčnou proliferaci, indukuje apoptózu a diferenciaci maligních buněk, je schopna zvýšit protirakovinný účinek konvenční chemoterapie, kontrolovat rakovinné metastázy a zlepšit kvalitu života (Vucenik and Shamsuddin 2006, Vucenik 2016, Vucenik et al. 2020, Chatree et al. 2020, Kumar et al. 2010, aj.). Vědecké studie prováděné v posledních letech také ukázaly pozitivní vliv PA na podporu celistvosti jaterních a nervových buněk, což lze využít při podávání chemoterapeutik (Rážová 2016). Obsáhlou studii účinků myo-inositolu a možností využití této látky v nových způsobech doposud neprozkoumaných oblastí terapie mnoha gynekologických, endokrinologických onemocnění a steroidogeneze přináší review Dinicola et al. (2021).

Díličí vědecké práce uvádějí výsledky terapeutického použití PA při diabetu, ateroskleróze a ischemické chorobě srdeční nebo také ke snížení toxicity těžkých kovů (Kumar et al. 2010). Například v léčbě cukrovky se příznivé působení fytátů projevuje regulací sekrece inzulínu prostřednictvím inhibice aktivity serin/threonin specifické protein fosfatázy, enzymu důležitého pro

uvolňování inzulínu (Larsson et al. 1997, Barker and Berggren 1999). Pro diabetické pacienty je prospěšné rovněž zjištění, že konzumace PA snižuje stravitelnost škrobu (v důsledku inhibice enzymu α -amylázy), omezuje střevní absorpci glukózy a tím i její hladinu v krvi. Dochází tak ke zlepšení zdravotního stavu zažívacího systému pacientů (Kumar et al., 2020; Yoon, Thompson, & Jenkins, 1983, aj.) a současně je podpořen příjem glukózy ve svalech, což ukazuje na možnost využití této látky jako antihyperglykemického doplňku stravy v potravinových produktech pro diabetiky (Chukwuma et al. 2016).

Vysoká afinita PA ke kovovým iontům ovlivňuje některé metabolické reakce a pozitivně působí v prevenci různých onemocnění. Norhaizan et al. (2011) zjistili, že interakce PA se zinkem, vede ke snížení hladiny cholesterolu v séru a ke snížení poměru Zn:Cu a to se příznivě projevuje při prevenci rakoviny a koronárního srdečního onemocnění. Silná afinita PA k vápníku zase zabraňuje tvorbě ledvinových kamenů (urolitiáze) v důsledku kompetice s oxalátem, jehož přítomnost v kombinaci s Ca přispívá k rozvoji tohoto onemocnění (Fuster et al. 2017, D'Alessandro et al. 2019). Bevilacqua et al. (2015) zkoumali v oblasti gametogeneze savců a lidské reprodukce účinek PA na kvalitu oocytů a spermií a diskutují perspektivní možnosti jejího využití při asistované reprodukci. Ukazuje se, že PA a myo-inositol mohou rovněž hrát výraznou roli v energetickém metabolismu a metabolických poruchách, například při citlivosti a rezistenci na inzulín nebo vykazovat další vlastnosti s významem od buněčné signalizace až po metabolismus glukózy nebo sacharidů (Chatree et al. 2020). Identifikace specifických signalizačních funkcí pro inositolpolyfosfáty v různých typech buněk vedla k získání nových informací o jejich významu v regulaci některých buněčných procesů a zdůraznila možnost nových farmakologických intervencí u mnoha onemocnění (Maffucci and Falasca 2020). Kromě toho nedávné studie naznačily účinnost PA jako inhibitoru alimentárních patogenů (Bloot et al. 2021) a ve stadiu výzkumu jsou ještě další možnosti uplatnění významných zdravotních a farmaceutických vlastností této látky.

Široké možnosti využití antioxidačních a antimikrobiálních účinků PA jsou také v dalších oblastech péče o zdraví jako například v dermatologii, stomatologii nebo kosmetice. V potravinářství se PA nachází v databázi přídatných látek pod označením E391 a přesto, že má pozitivní vliv na trvanlivost, barvu a další vlastnosti potravin, především masných výrobků (Narayanayswamy and Norhaizan 2018), v EU není její použití v potravinách povoleno.

Zajímavé údaje uvádějí Sharma et al. (2020), kteří ve svém minireview popisují pozitivní farmakologické účinky aplikace enzymu fytázy při kontrole diabetu, aterosklerózy, ischemické choroby srdeční, urolitiázy, inhibici viru lidské imunodeficiency (HIV) a toxicity těžkých kovů u lidí i hospodářských zvířat. Uplatňuje se zde zejména schopnost tohoto enzymu hydrolyzovat PA na nižší inositolfosfáty, které se zapojují například do funkce transmembránových signálních systémů nebo mobilizace vápníku z intracelulární části živočišných tkání.

Souhrn

Kyselina fytová, látka s bioaktivní účinností, která se vytváří v rostlinách, je hlavní zásobní formou fosforu v semenech významných potravinářských a krmivářských plodin, zejména obilovin, luskovin a olejnatých semen. V důsledku silného negativního náboje tato sloučenina chelatuje dvou a vícemocné

kovy a vytváří s nimi komplexní soli zvané fytáty, které jsou velmi špatně rozpustné a tedy málo využitelné pro lidi a nepřežvýkavá zvířata. Z tohoto pohledu představuje tedy PA a její soli nežádoucí antinutriční látky, které ovlivňují využitelnost fosforu, dalších makro- a zejména mikroprvků a jiných živin, se kterými PA váže (např. různé enzymy, bílkoviny i sacharidy). Z hlediska zabezpečení optimálního příjmu nezbytných mikroživin je největším problémem její afinita k mikroprvkům jako je Fe a Zn, jejichž nedostatek je celosvětově nejvýznamnějším příčinou podvýživy a s ní spojenými významnými zdravotními problémy, především v rozvojových zemích a u lidí, kteří konzumují rostlinnou stravu s převažujícím podílem výše uvedených plodin. Ve výživě hospodářských zvířat, zejména monogastrických, se nepříznivé působení fytátového fosforu projevuje ve sníženém využití živin, zvýšených nákladech na produkci a ve zhoršení zdravotního stavu. Kromě toho nevyužitý fosfor, organicky vázaný v exkrementech, představuje významnou negativní zátěž pro životní prostředí.

Na druhé straně stále větší počet klinických a farmaceutických výzkumů dokazuje, že inositolfosfáty, především PA a myo-inositol mají řadu pozitivních zdravotních a fyziologických výhod, a to jak v prevenci, tak i v léčbě různých onemocnění, zejména civilizačních. Přesto, že byla jejich přítomnost prokázána ve všech eukaryotických organismech již v minulém století, hlavně výsledky získané v posledních dvou desetiletích dokladují široký, ale doposud ještě plně nevyužitý terapeutický potenciál mnohých farmaceutických aktivit těchto sloučenin. K nejvýznamnějším patří antibakteriální, antikancerogenní, anti-diabetické, antiangiogenní, hypolipidemické, anti-ulcerózní, karyostatické, hemolytické, hypoalergenní, imunomodulační, neuroprotektivní a další účinky a také schopnost inhibovat aktivitu některých nežádoucích enzymů. Za výrazně kontroverzní

rolí PA, především z pohledu využití v lidské výživě, jsou odpovědné její chemické a fyzikální vlastnosti, zejména vysoká antioxidační aktivita, inhibiční schopnost a afinita k některým minerálním látkám a živinám (zejména bílkovinám). Proto se názory na tuto sloučeninu liší podle toho, z jakého pohledu ji posuzujeme. V zemích, kde je strava obyvatel z větší části vyvážená, nepředstavují antinutriční účinky PA a jejich sloučenin významné zdravotní nebezpečí a jsou zde kladně přijímány především její příznivé zdravotní účinky. V těchto oblastech lze tedy považovat za neopodstatněná doporučení některých odborníků, aby se spotřebitelé vyhýbali konzumaci většího množství celozrnných, vysoce fytátových potravin. Jiná situace ale platí pro obyvatele zemí, zejména rozvojových, kde převažuje rostlinná strava na bázi plodin s geneticky podmíněným vysokým obsahem PA. V zájmu zlepšení zdravotního stavu ohrožených skupin obyvatel je nezbytné usilovat o snížení příjmu této sloučeniny, a to kombinací všech možných postupů, včetně zemědělských intervencí a fortifikací mikroživin, podpory lepšího stravování, zvláštní pozorností věnovanou genderovým otázkám a zranitelným skupinám, zlepšením kvality zdravotních služeb, apod. Nicméně mnozí výzkumní pracovníci a nutriční specialisté upozorňují, že intervence ze strany jiných zemí nepovedou k výrazným změnám a za nejlepší přístup považují nadále posilovat vzdělání obyvatel, aby mohli sami provádět kontrolu příjmu a využívání fytátů s vědomím jejich dopadu na své zdraví.

Seznam použité literatury je k dispozici u autorek příspěvku.

Dedikace:

Příspěvek byl vypracovaný za podpory Ministerstva zemědělství, institucionální podpora MZE - RO1118.

