Chemické Listy

12
ročník • 119

Elektrochemické stanovení warfarinu

O hořkém hořci

Spolupráce v oblasti radiofarmak

J. A. Komenský a alchymie

CHLSAC 119 (12) 661—708 (2025) ISSN 0009-2770 http://www.chemicke-listy.cz

PF 2026

Děkujeme všem našim
čtenářům a přispěvatelům
za jejich přízeň a důvěru,
přejeme krásné Vánoce a mnoho
zdraví, radosti a úspěchů
v novém roce.

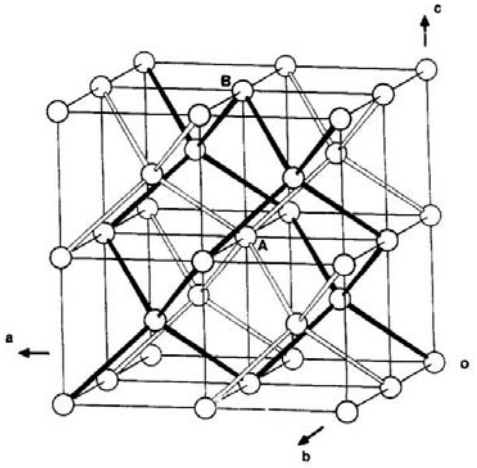
Nobelovy ceny jsou rozdány

Jako již tradičně od roku 1901, 10. prosince tohoto roku, v den úmrtí Alfreda Nobela, byly v koncertní síni ve švédském Stockholmu slavnostně předány nejprestižnější ceny nesoucí jeho jméno. Ty jsou udělovány jednotlivcům a organizacím za zásadní vědecké objevy v oblastech fyziologie a lékařství, fyziky a chemie, za výjimečný přínos v oblasti literatury a za úsilí o zachování míru. O udělení rozhodují Královská švédská akademie věd, Švédská akademie, Institut Karolinska a norský Nobelův výbor. Pro Chemické listy jsou logicky nejzajímavější ceny udělené za chemii. V letošním roce Susumu Kitagawa z Kyotské univerzity v Japonsku, Richard Robson z Melbournské univerzity v Austrálii a Omar M. Yaghi z Kalifornské univerzity v Berkeley, USA, získali Nobelovu cenu za chemii pro rok 2025 za vývoj nového typu molekulární architektury. Oficiálním důvodem uvedeným Královskou švédskou akademií věd pro její udělení právě těmto třem vědcům je vývoj metalo-organických vysoce porézních materiálů anglicky nazvaných samotným Yaghim metal-organic frameworks (MOF). Přiložené obrázky (obr. 1–3) ukazují příklady typických struktur publikovaných laureáty.

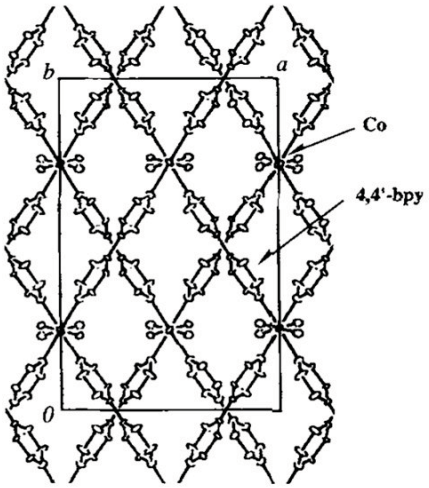
Robson vycházel z modelů, které vymýšlel pro své studenty. Již v roce 1989 nakreslil krystalickou strukturu, jež obsahovala velké množství „děr“, tedy pórů, vzniklou pospojováním dvou různých molekul. V názvu své první publikace[1] již použil výraz „framework“. Tato struktura však nebyla stabilní. Na kloub problému stability porézního materiálu přišel Kitagawa v roce 1997 a ve svém článku[2] publikovaném v Angewandte Chemie, jež v názvu rovněž obsahuje slovo „framework“, popsal přípravu porézních materiálů vzniklých koordinací 4,4'-bipyridinu a různých kovových iontů, včetně kobaltu, niklu či zinku. Ve své práci prokázal, že tyto mikroporézní materiály lze použít k adsorpci methanu, dusíku a kyslíku. Yaghi vyvíjí MOF od roku 1995 (cit.[3]). Kromě MOF připravil i další třídy podobných nových materiálů, a to kovalentní organické struktury (COF) a zeolitické imidazolátové struktury (ZIF).

Důležité je, že velikost pórů a chemická funkcionalita MOF se dají nastavit vhodným výběrem složek, z nichž se připravují, tedy iontu kovu a polyfunkční (většinou bi- nebo trifunkční) organické spojky, ligandu. Předpokládá se, že do současnosti bylo již připraveno a charakterizováno více jak 100 000 MOF. Počet publikací zabývajících se různými aspekty zahrnujícími MOF jde určitě do statisíců a počet dalších možných kombinací, a tedy potenciál dalších nových struktur, je obrovský. O MOF rovněž vyšlo i několik knih.

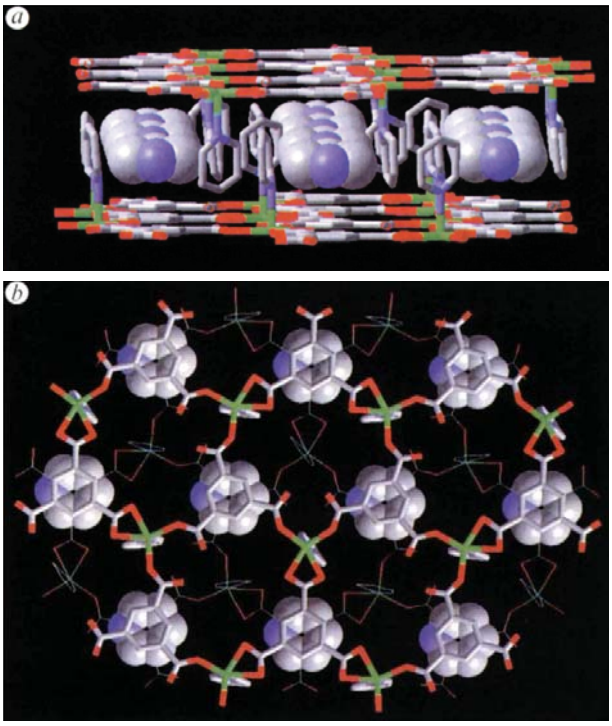
Jak ukazují obrázky, MOF je poměrně veliká jednotka, pro níž je obtížné, ne-li nemožné, nalézt systematický název. Proto se tento problém obchází použitím dlouhého a málo praktického názvu, např. zinek-1,4-benzendikarboxylát. Daleko častěji se proto používají „triviální“ názvy podle místa vzniku, tedy laboratoře, univerzity či projektu. Jako příklady lze uvést názvy nejběžněji používaných matriálů, jako jsou MOF-5, tedy metalo-organický framework číslo 5 připravený Yaghiho skupinou ze zinečnaté soli a benzen-1,4-dikarboxylové (tereftalové) kyseliny, HKUST-1 z Hong Kong University of Science and Technology připravený z měďnaté soli a benzen-1,3,5-trikarboxylové kyseliny, UiO-66, tedy MOF na bázi zirkonu



Obr. 1. **Reprezentace dvou nezávislých, vzájemně pronikajících diamantoidních struktur.** Mód průniku pozorovaný pro $Zn(CN)_2$ a $Cd(CN)_2$, který vzniká, když jsou centra A a B různého typu (cit.[5])



Obr. 2. **Krystalická struktura koordinačního polymeru $\{[Co_2(4,4'\text{-bpy})_3(NO_3)_4]\cdot(H_2O)_4\}_n$.** Vodíkové atomy a nitrátové anionty nejsou pro přehlednost ukázány (cit.[2])



Obr. 3. **(a) Perspektivní nákres struktury $CoC_6H_3(COOH_{1/3})_3(NC_6H_5)_2 \cdot 2/3\ NC_5H_5$ v pevné fázi, kolmý k ose *z*.** Vrstvy kobaltkarboxylátu s ukotvenými pyridiny jsou pro přehlednost znázorněny jako čárové kresby. Hostující molekuly pyridinu jsou zobrazeny pomocí prostorově vyplňujícího modelu na základě van der Waalsových poloměrů, aby bylo znázorněno jejich obsazení kanálů ve struktuře. **(b) Pohled na strukturu $CoC_6H_3(COOH_{1/3})_3(NC_6H_5)_2 \cdot 2/3\ NC_5H_5$ v pevné fázi podél osy *z*, znázorňující π-vrstvení pyridinových hostů s benzenovými kruhy jednotek benzentrikarboxylové kyseliny.** Pro přehlednost je horní vrstva znázorněna silnějšími čarami než spodní vrstva (cit.[3])

s benzen-1,4-dikarboxylovými spojkami z University in Oslo, nebo MIL-101, což je MOF s velkými póry pocházející z Materials Institute Lavoisier, který je připravovaný z chromité soli a tereftalové kyseliny.

Některé z těchto materiálů se vyznačují velmi malou hustotou a dosud nejvyšším známým měrným povrchem, tedy počtem metrů čtverečních povrchu přítomných v jednom gramu materiálu. Například v materiálu DUT 60, pocházejícím z Drážďanské technologické univerzity (Dresden University of Technology), byl naměřen specifický povrch 7 000 m^2/g, což odpovídá zhruba ploše jednoho fotbalového hřiště. Díky tomu byly MOF shledány užitečnými v mnoha aplikacích, včetně skladování a separace vodíku, methanu a oxidu uhličitého, přeměně oxidu uhličitého na paliva a vysoce hodnotné chemikálie, zachycování vody ze vzduchu pro získávání pitné vody, v imobilizaci enzymů pro štěpení bílkovin, v superkondenzátorových zařízeních, bateriích a dalších. Yaghi posléze tento obor nazval „retikulární chemie" a definuje jej jako „spojování molekulárních stavebních bloků do rozsáhlých struktur pomocí silných vazeb". Na toto téma vydal Yaghi spolu s Kalmutzkim a Diercksem v roce 2019 knihu[4] s názvem „Introduction to Reticular Chemistry: Metal-Organic Frameworks and Covalent Organic Frameworks".

Ačkoliv se ve světě momentálně zabývá výrobou MOF ve větším měřítku pro nejrůznější aplikace již osm firem – od velkých, jako je BASF, až po malé startupy – jejich použití zatím zdaleka neodpovídá jejich potenciálu. Hlavní výzvy pro rozsáhlé průmyslové využití jsou škálovatelnost, protože velkokapacitní syntéza MOF za nízké náklady zůstává určitou překážkou, omezená stabilita některých MOF, které jsou citlivé na vlhkost, teplo nebo chemikálie, a konečně i jejich integrace do stávajících masových průmyslových systémů, což může být složité. To ovšem neznamená, že MOF zůstanou akademickou záležitostí. Sám Yaghi, který neustále a neúnavně studuje a propaguje MOF, předpokládá jejich vskutku široké praktické uplatnění v řádu několika málo let. Soudím tedy, že MOF čeká vskutku skvělá budoucnost.

František Švec

LITERATURA

1. Hoskins B. F., Robson R.: Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. J. Am. Chem. Soc. *111*, 5962 (1989).
2. Kondo M., Yoshitomi T., Matsuzaka H., Kitagawa S., Seki K.: Three-dimensional framework with channeling cavities for small molecules: $\{[M_2(4,4'\text{-bpy})_3(NO_3)_4]\cdot xH_2O\}_n$ (M = Co, Ni, Zn). Angew. Chem., Int. Ed. Engl. *36*, 1725 (1997).
3. Yaghi O. M., Li G., Li H.: Selective binding and removal of guests in a microporous metal-organic framework. Nature *378*, 703 (1995).
4. Yaghi O. M., Kalmutzki M. J., Diercks C. S.: *Introduction to Reticular Chemistry: Metal-Organic Frameworks and Covalent Organic Frameworks*, Wiley-VCH, Weinheim 2019.
5. Hoskins B. F., Robson R.: Design and construction of a new class of scaffolding-like materials comprising infinite polymeric frameworks of 3D-linked molecular rods. A reappraisal of the $Zn(CN)_2$ and $Cd(CN)_2$ structures and the synthesis and structure of the diamond-related frameworks $[N(CH_3)_4][Cu^IZn^{II}(CN)_4]$ and Cu^I[4,4',4",4'"-tetracyanotetraphenylmethane]$BF_4 \cdot xC_6H_5NO_2$. J. Am. Chem. Soc. *112*, 1546 (1990).

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Full text English translation available in the on-line version (click here)

Referát

www.chemicke-listy.cz

VYUŽITIE ELEKTROCHEMICKÝCH ANALYTICKÝCH METÓD PRI STANOVENÍ LIEČIVA WARFARÍNU

Nové pohľady na analytickú chémiu*

Článok je venovaný prof. RNDr. Jiřímu Zimovi, CSc., pri príležitosti jeho nadchádzajúcich 70. narodenín.

VICTÓRIA ŽUŽIČOVÁ a VLASTIMIL VYSKOČIL

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra analytické chemie, UNESCO laboratoř elektrochemie životního prostředí, Hlavova 8, 128 00 Praha 2, Česká republika
victoria.zuzicova@natur.cuni.cz, vlastimil.vyskocil@natur.cuni.cz

Došlo 8.9.25, prijaté 3.11.25.

Warfarín je antikoagulačné liečivo s úzkym terapeutickým indexom. Jeho presné stanovenie je nevyhnutné na zabezpečenie účinnej a bezpečnej liečby, keďže aj malé odchýlky môžu viesť k vážnym nežiaducim účinkom. Na jeho stanovenie sa využíva široká škála analytických metód, vrátane spektrometrických a separačných techník. Elektrochemické metódy sa vyznačujú jednoduchým experimentálnym usporiadaním a nízkymi nákladmi, pričom umožňujú rýchlu analýzu s vysokou citlivosťou a dostatočnou selektivitou. Vďaka týmto výhodám predstavujú efektívnu alternatívu pri stanovení liečiv a nachádzajú uplatnenie v klinickej diagnostike, kontrole kvality liečiv či environmentálnych analýzach metabolitov liekov. Tento prehľad popisuje fyzikálno-chemické a biologické vlastnosti warfarínu a porovnáva rôzne analytické prístupy jeho stanovenia s dôrazom na elektrochemické metódy.

Kľúčové slová: elektrochémia, analýza liečiv, warfarín, antikoagulanciá, voltampérometria, ampérometria

Obsah

1. Úvod
2. Warfarín
   2.1. Fyzikálne a chemické vlastnosti
   2.2. Biologické vlastnosti
   2.3. Elektrochemické vlastnosti
3. Stanovenie warfarínu
   3.1. Neelektrochemické metódy stanovenia
   3.2. Elektrochemické metódy stanovenia
4. Záver

Mgr. Victória Žužičová *ukončila v roku 2023 bakalárske štúdium v odbore Medicinálna chémia na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Karlovej v Prahe. Na rovnakej fakulte ukončila v roku 2025 nadväzujúce magisterské štúdium v odbore Analytická chémia. Už od bakalárskeho štúdia sa aktívne venuje elektroanalytickým metódam.* ***Výsledky svojej práce prezentovala na celoštátnej súťaži o najlepšiu študentskú vedeckú prácu v obore analytická chémia „O cenu Karla Štulíka 2025“.*** *V súčasnosti je študentkou 1. ročníka doktorského štúdia v odbore Analytická chémia na Katedre analytickej chémie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Karlovej. Jej výskum sa zameriava na vývoj nových elektrochemických biosenzorov na báze DNA a elektrochemických prevodníkov s využitím netradičných elektródových materiálov (intermetalické fázy, nanoštruktúrované formy uhlíkových materiálov).*

1. Úvod

Warfarín sa prvýkrát objavil v 20. rokoch 20. storočia po sérii záhadných úmrtí hovädzieho dobytka v oblasti Severnej Dakoty a Kanady. Zistilo sa, že príčinou bola konzumácia skazeného sena, v ktorom sa pôsobením plesní premieňali prirodzene sa vyskytujúce kumaríny na dikumarol, ktorý má antikoagulačné účinky. Výskum bol

Metrohm Česká republika

* Tento příspěvek je součástí seriálu Nové pohledy na analytickou chemii sponzorovaného firmou Metrohm Česká republika s.r.o. (www.metrohm.cz) a zahrnujícího jak příspěvky mladých kolegů (**Rising Stars in Analytical Chemistry**), tak i kolegů na vrcholu jejich publikační aktivity (**Experienced Researchers**), případně i vítanou kombinaci obojího.

finančne podporený nadáciou WARF (Wisconsin Alumni Research Foundation), podľa ktorej dostala novo syntetizovaná látka svoje meno. Warfarín sa prvýkrát dostal na trh v roku 1948 ako rodenticíd. V roku 1954 bol, vo forme vo vode rozpustnej sodnej soli, schválený aj na humánne použitie ako antikoagulačné liečivo pod komerčným názvom Coumadin. Dnes sa ako rodenticídy využívajú jeho analógy nazývané superwarfaríny, zatiaľ čo warfarín sodný sa stále používa ako antikoagulant v klinickej praxi[1].

2. Warfarín

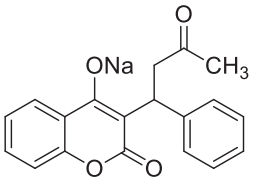
2.1. Fyzikálne a chemické vlastnosti

Warfarín, chemickým názvom 4-hydroxy-3-(3-oxo-1--fenylbutyl)kumarín (registračné číslo CAS (Chemical Abstract Service) je 81-81-2), je nepriame perorálne antikoagulans. Je to látka kyslej povahy s disociačnou konštantou $pK_a \approx 5{,}6$. Warfarín je prakticky nerozpustný vo vode, dobre rozpustný v alkoholoch a organických rozpúšťadlách. Jeho sodná soľ je nerozpustná v organických rozpúšťadlách, ale je dobre rozpustná vo vode a v etanole, preto sa ako liečivo využíva práve warfarín sodný (WAR). Štruktúra WAR je uvedená na obr. 1, sumárny vzorec je $C_{19}H_{15}NaO_4$ a registračné číslo CAS sodnej soli je 129-06-6. Molekulová hmotnosť sodnej soli je 330,3 g mol^{-1}. Štruktúru tvorí aromatické kumarínové jadro s hydroxylovou skupinou v polohe 4. V polohe 3 je substituovaný benzylidenacetónovým reťazcom, ktorý obsahuje chirálny uhlík. WAR má dve enantiomerné formy, *R*- a *S*-WAR, ale pre farmaceutické účely sa používa ich racemická zmes[2].

WAR sa bežne vyskytuje v dvoch formách, a to ako kryštalický, tvorený klatrátom s propan-2-olom, a amorfný. Kryštalický WAR je biely hygroskopický prášok bez zápachu. Má stabilnú a dobre definovanú štruktúru, preto sa využíva v tabletách. Naopak amorfný WAR je menej stabilný a citlivý na vlhkosť, ale má vyššiu rozpustnosť vo vode, a preto sa využíva ako účinná látka v suspenziách[3].

2.2. Biologické vlastnosti

Najčastejšou indikáciou WAR je liečba a prevencia fibrilácie predsiení, poruchy srdcového rytmu a s ňou spojených tromboembolických komplikácií. WAR sa ďalej používa pri prevencii a liečbe žilnej trombózy a pľúcnej embólie, pri komplikáciách spojených s náhradou srdcových chlopní a ako prevencia opätovného vzniku krvných zrazenín po infarkte myokardu[4].



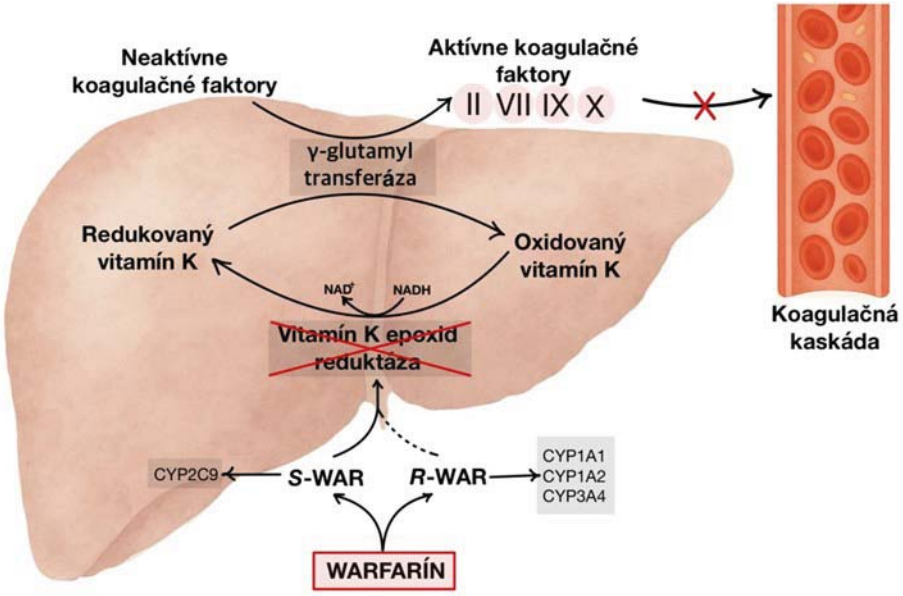
Obr. 1. **Štruktúrny vzorec WAR**

Mechanizmus účinku bol prvýkrát popísaný až v roku 1978, a teda vyše 20 rokov po jeho uvedení na trh. Antikoagulačný účinok WAR spočíva v inhibícii enzýmu vitamín K epoxid reduktázy (VKOR), enzýmu zodpovedného za regeneráciu vitamínu K v pečeni. VKOR katalyzuje premenu oxidovanej formy, vitamín K epoxidu, na redukovanú formu, vitamín K hydrochinón, čo je jeho aktívna forma. Aktívny vitamín K je dôležitým kofaktorom pre enzým γ-glutamylkarboxylázu, ktorý zabezpečuje posttranslačnú γ-karboxyláciu koagulačných faktorov II, VII, IX a X a antikoagulačných proteínov C a S. Karboxylácia umožňuje proteínom naviazať vápenaté ióny, čo je zásadné pre ich správnu funkciu. Nekarboxylované koagulačné faktory sú biologicky neaktívne a spôsobujú prerušenie koagulačnej kaskády. WAR sa ireverzibilne viaže na VKORC1, podjednotku 1 enzýmu VKOR, a tak dochádza k postupnému vyčerpaniu aktívnej formy vitamínu K. Keďže účinok nie je priamy, jeho účinok je oneskorený a antikoagulačný efekt nastupuje v priebehu piatich až siedmych dní. Na obr. 2 je schematicky znázornený mechanizmus účinku WAR[4–6].

WAR je podávaný prevažne perorálnou formou, má vysokú biologickú dostupnosť a je takmer úplne absorbovaný v gastrointestinálnom trakte. Maximálnu plazmatickú koncentráciu dosahuje v priebehu 1,5 až 4 hodín. V krvi je z 99 % viazaný na plazmatické bielkoviny, najmä albumín, vďaka čomu má malý distribučný objem 0,08–0,12 l kg^{-1}. WAR je racemická zmes *S*- a *R*-enantioméru, pričom *S*-WAR je tri- až päťkrát účinnejší, a má teda hlavný vplyv na antikoagulačný efekt[2,4].

Metabolizmus prebieha prevažne v hepatocytoch prostredníctvom enzýmov cytochrómov P450 (CYP), pričom každý z enantiomérov je metabolizovaný inou cestou. Hlavnou metabolickou dráhou je oxidácia na hydroxyderiváty. Hlavným enzýmom je CYP2C9, ktorý katalyzuje oxidáciu na 6- a 7-hydroxy-*S*-warfarín. Metabolizmus *R*-warfarínu je komplexnejší, prebieha najmä za účasti enzýmov CYP1A1, CYP1A2 a CYP3A4 za vzniku hydroxyderivátov *R*-WAR. Za účasti iných izoenzýmov CYP vznikajú aj ďalšie oxidačné produkty *S*- a *R*-WAR. V menšej miere môžu deriváty *R*-WAR podliehať konjugácii s glukoronidmi alebo sulfátmi, avšak táto dráha sa ukazuje u ľudí ako zanedbateľná. Minoritnou dráhou, nezávislou na enzýmoch CYP, je aj redukcia ketoskupiny na alkoholové metabolity[2].

WAR je takmer úplne metabolizovaný a len minimálne množstvo je vylúčené v nezmenenej podobe. Vylučovaný je prevažne močom (80 %) a menej stolicou (20 %). Eliminačný polčas je veľmi variabilný a vplýva naň veľa individuálnych parametrov. Pre *S*-WAR sa pohybuje v rozpätí 24–33 hodín a pre *R*-WAR 35–58 hodín. Keďže *R*-WAR má dlhší polčas eliminácie, prispieva k udržiavaniu ustálenej plazmatickej koncentrácie medzi jednotlivými dávkami. WAR prechádza cez placentárnu bariéru, a preto sa počas tehotenstva, najmä 1. a 3. trimestra, jeho užívanie



Obr. 2. **Mechanizmus účinku WAR v organizme**

neodporúča, vzhľadom na riziko teratogenity. Naopak do materského mlieka v klinicky významnom množstve neprechádza, a preto je počas dojčenia považovaný za bezpečný[2,5].

Keďže ide o liečivo, ktoré má úzky terapeutický index a veľkú interindividuálnu variabilitu, nastavenie dávkovania je veľmi náročné. Najmä počas počiatočnej fázy liečby môže dochádzať ku komplikáciám spôsobeným nedostatočnou koaguláciou alebo naopak nadmerným zriedením krvi s rizikom vykrvácania. Na monitorovanie dávkovania WAR sa používa medzinárodný normalizovaný pomer (INR, z angl. international normalized ratio). Počíta sa ako pomer protrombínového času, doby vytvorenia zrazeniny vo vzorke krvi po pridaní činidla, pacienta k referenčnému času. Nižšia hodnota naznačuje zvýšenú zrážanlivosť krvi. Fyziologická hodnota INR má hodnotu okolo 1,0 a pri warfarínovej terapii je približne v rozsahu 2,0–3,0, prípadne vyššia[7].

Z genetického hľadiska má na tieto rozdiely najväčší vplyv polymorfizmus v dvoch génoch, a to pre už spomínané enzýmy VKORC1 a CYP2C9. Tie ovplyvňujú rýchlosť metabolizmu a citlivosť organizmu na WAR. Medzi klinické faktory patrí hlavne vek, pohlavie, telesná hmotnosť, prípadné ďalšie ochorenia a súbežne užívané lieky. Rovnako dôležité sú aj environmentálne podmienky a stravovacie návyky pacienta. Jedným z hlavných faktorov je príjem vitamínu K v potrave, ktorý priamo ovplyvňuje účinok WAR. Medzi ďalšie faktory patrí fajčenie, konzumácia alkoholu a črevný mikrobióm[5].

Potreba neustáleho monitorovania INR a nebezpečné vedľajšie účinky viedli k vývoju novej generácie perorálnych antikoagulačných liečiv (DOAC, z angl. direct oral anticoagulants). DOAC majú menej potravinových a liekových interakcií, jednoduchšie nastavenie dávkovania a menšie riziko vnútorného krvácania. Napriek týmto výhodám je pre určité skupiny pacientov a indikácie, napríklad v prípade mechanických srdcových chlopní alebo pri renálnej insuficiencii, warfarín stále jedinou schválenou možnosťou perorálnej antikoagulačnej liečby. Okrem toho je liečba DOAC násobne drahšia, čo v klinickej praxi predstavuje veľké obmedzenie[8].

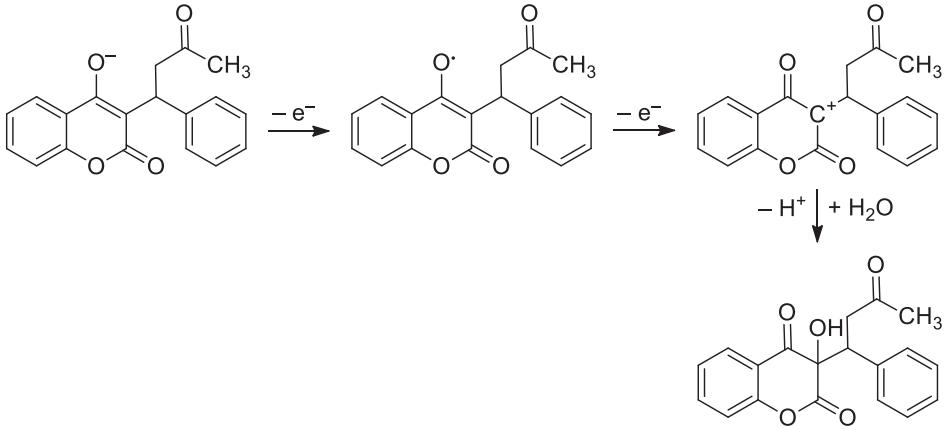
2.3. Elektrochemické vlastnosti

Elektrochemická oxidácia WAR predstavuje ireverzibilný proces, v ktorom je kľúčová hydroxylová skupina na kumarínovom jadre. Tá je významná aj z hľadiska biologického účinku WAR, pretože interaguje s enzýmom VKORC1. Elektrochemické metódy môžu do určitej miery slúžiť na simuláciu dejov prebiehajúcich v organizme.

Schéma mechanizmu popísaného v práci[9] je uvedená na obr. 3. Oxidácia je realizovaná ako dvojkrokový proces, pri ktorom sú spotrebované dva elektróny. V prvom kroku dochádza k oxidácii hydroxylovej skupiny na veľmi reaktívny radikál. Ten v druhom kroku rýchlo podlieha ďalšej oxidácii a vzniká chinónová štruktúra, ktorá je stabilná vďaka konjugácii π-elektrónov.

3. Stanovenie warfarínu

Vzhľadom na riziko závažných vedľajších účinkov a úzky terapeutický index má spoľahlivé stanovenie WAR veľký význam. V posledných rokoch narastá záujem zapo-



Obr. 3. **Schéma elektrochemickej oxidácie WAR**

jiť pacientov do kontroly ich zdravotného stavu, čo podporuje rozvoj zariadení typu point-of-care (POC), ktoré umožňujú rýchle a jednoduché monitorovanie hladiny WAR v krvi. Zásadné je aj presné a spoľahlivé stanovenie WAR vo farmaceutických vzorkách s cieľom zabezpečiť ich kvalitu a stabilitu. Preto má vývoj rýchlych, cenovo dostupných a citlivých metód veľký význam.

3.1. Neelektrochemické metódy stanovenia

Medzi najčastejšie používané metódy patria chromatografické a spektrofotometrické techniky. Z hľadiska citlivosti, selektivity a možnosti separácie enantiomérov dominuje vysokoúčinná kvapalinová chromatografia (HPLC) kombinovaná s UV-Vis spektrofotometriou, fluorimetriou alebo hmotnostnou spektrometriou ako detekčnou technikou. Príkladom je metóda na simultánne stanovenie 18 látok vrátane WAR pomocou kvapalinovej chromatografie s tandemovou hmotnostnou spektrometriou (LC-MS/MS). V práci bola skúmaná plná krv, plazma, ale aj menej časté vzorky, ako je sklovec a žlč. Bola dosiahnutá medza detekcie 19,7 nmol l^{-1} (hodnota bola vypočítaná na základe uvedenej medze stanoviteľnosti 20 ng ml^{-1}). Výhodou metódy je malá spotreba vzorky a jej jednoduchá predúprava. Za veľmi krátku dobu je možné stanoviť viacero látok podobnej povahy naraz, preto je vhodná pre forenznú toxikológiu[10].

Chromatografickými metódami je možné rozlíšiť a stanoviť jednotlivé enantioméry. Príkladom je práca, kde bola využitá HPLC s fluorescenčnou detekciou. Boli dosiahnuté medze detekcie 0,067 ppm (0,22 μmol l^{-1}) pre *R*-WAR a 0,090 ppm (0,29 μmol l^{-1}) pre *S*-WAR. Metóda je spoľahlivá, vhodná pre rutinné monitorovanie a bola aplikovaná na stanovenie v krvnej plazme pacientov na warfarínovej terapii[11].

Ďalším využitím týchto metód je sledovanie vzájomnej interakcie liečiv vo farmakokinetických štúdiách. Za použitia RP-HPLC s UV-detekciou bola vyvinutá metóda na simultánne stanovenie warfarínu, aspirínu a klopidogrelu, ktoré bývajú užívané v kombinácii pri takzvanej trojitej antitrombotickej liečbe. Metóda vykazovala dobrú linearitu v koncentračnom rozsahu 5–200 μg ml^{-1} (16–650 μmol l^{-1}). Bola dosiahnutá medza detekcie 4,9 nmol l^{-1} (hodnota bola vypočítaná na základe uvedenej medze stanoviteľnosti 5 ng ml^{-1}). Metóda bola taktiež hodnotená z pohľadu zelenej analytickej chémie, kde dosiahla uspokojivé výsledky[12].

Používané sú aj iné chromatografické metódy. Plynová chromatografia s elektrónovou ionizáciou a tandemovou hmotnostnou spektrometriou (GC-EI-MS/MS) bola použitá na stanovenie WAR a jeho piatich hydroxyderivátov s využitím Fentonovej reakcie. Bola dosiahnutá linearita v koncentračnom rozsahu 26–1543 ng ml^{-1} (84–5005 nmol l^{-1}) a medze detekcie pre jednotlivé analyty v rozsahu 18,7–67,0 ng ml^{-1} (60,7–217 nmol l^{-1}). Keďže umožňuje stanoviť WAR aj jeho degradačné produkty, je vhodná na monitorovanie životného prostredia, napríklad vo vzorkách odpadových vôd[13].

Zaujímavú a novú alternatívu stanovenia WAR predstavuje práca, v ktorej bol použitý fluorescenčný senzor založený na uhlíkových kvantových bodkách dopovaných dusíkom (NCD). Tie boli syntetizované jednoduchou a rýchlou mikrovlnnou metódou z biomasy a metóda je vhodná aj z pohľadu zelenej chémie. Senzor bol za účelom zlepšenia selektivity kombinovaný so zariadením, ktoré využíva algoritmus strojového učenia, čo umožňuje stanovenie aj v zložitých a neznámych vzorkách. Medza detekcie WAR dosahovala hodnotu 0,039 μmol l^{-1}. Senzor bol aplikovaný na stanovenie WAR a jeho metabolitov vo vzorkách krvnej plazmy a stojatej vody[14].

Spektrofotometrické metódy sú vhodné predovšetkým na stanovenie WAR vo farmaceutických vzorkách, napríklad na kontrolu kvality počas výroby. Zároveň je to metóda uvádzaná v liekopisoch, vrátane Českého liekopisu[15], ako metóda stanovenia obsahu účinnej látky. Vďaka dobrej absorbancii WAR je metóda dostatočne citlivá, reprodukovateľná, a preto často používaná. Naopak spektrofotometrické metódy nie sú vhodné pre komplexné

biologické matrice alebo v prípadoch, kedy je nutné rozlíšiť jednotlivé enantioméry WAR.

3.2. Elektrochemické metódy stanovenia

Elektrochemické metódy predstavujú vhodnú alternatívu chromatografických a spektrofotometrických metód a získavajú si stále väčšiu pozornosť. K hlavným výhodám patrí jednoduché experimentálne usporiadanie, nenáročná manipulácia a ekonomická nenáročnosť, vďaka čomu sú vhodné aj pre menšie laboratória. Spravidla nie je potrebná zložitá predúprava vzorky. Sú menej náročné na spotrebu chemikálií, čo súvisí s nižšou tvorbou odpadu a zvyšuje udržateľnosť v súlade s princípmi zelenej chémie. Dôležitou analytickou prednosťou je rýchla analýza a vysoká citlivosť a selektivita. Veľkou výhodou je možnosť miniaturizácie, čo umožňuje ich využitie v prenosných zariadeniach vhodných pre merania v teréne. Vďaka týmto vlastnostiam majú uplatnenie v širokej škále oblastí analytickej chémie, hlavne vo farmaceutickej a environmentálnej analýze, potravinárstve či klinickej diagnostike.

Elektródový materiál zohráva dôležitú úlohu pri vývoji elektroanalytickej metódy. Nemodifikované elektródy sú častokrát voľbou vďaka ich jednoduchosti, cenovej dostupnosti a ich citlivosť je pre veľa aplikácií dostačujúca. Príkladom je práca Hasmemi a spol.[16], v ktorej bol vyvinutý jednoduchý, lacný a citlivý senzor založený na uhlíkovej pastovej elektróde (CPE). Za optimálnych podmienok bol získaný lineárny rozsah koncentrácií 30–3000 μmol l^{-1} a medza detekcie 0,315 μmol l^{-1}. Senzor vykazoval vysokú selektivitu k WAR aj v prítomnosti interferujúcich látok, napr. sodných a chloridových iónov či glukózy. Pri stanovení v tabletách bola dosiahnutá relatívna smerodajná odchýlka koncentrácie WAR 2,50 %, čo poukazuje na dobrú spoľahlivosť a reprodukovateľnosť senzora.

Nemodifikovaná elektróda bola využitá aj v práci de Jesus Guedes a spol.[17]. Bola vyvinutá metóda na stanovenie WAR technikami vsádzkovej injekčnej analýzy (BIA) a prietokovej injekčnej analýzy (FIA) pomocou multipulznej ampérometrie (MPA) na bórom dopovanej diamantovej elektróde (BDDE) s katodickou predúpravou. V prostredí fosfátového tlmivého roztoku o pH 7,0 s 10% obsahom etanolu bol určený lineárny rozsah koncentrácií 2–400 μmol l^{-1} pre BIA-MPA a 4–400 μmol l^{-1} pre FIA-MPA. Medze detekcie boli určené na 0,36 μmol l^{-1} pre BIA-MPA a 0,51 μmol l^{-1} pre FIA-MPA. Výhodami vyvinutých metód sú jednoduchá manipulácia, rýchlosť analýzy a vysoká frekvencia stanovení – 94 analýz za hodinu pre FIA-MPA a 130 analýz za hodinu pre BIA-MPA.

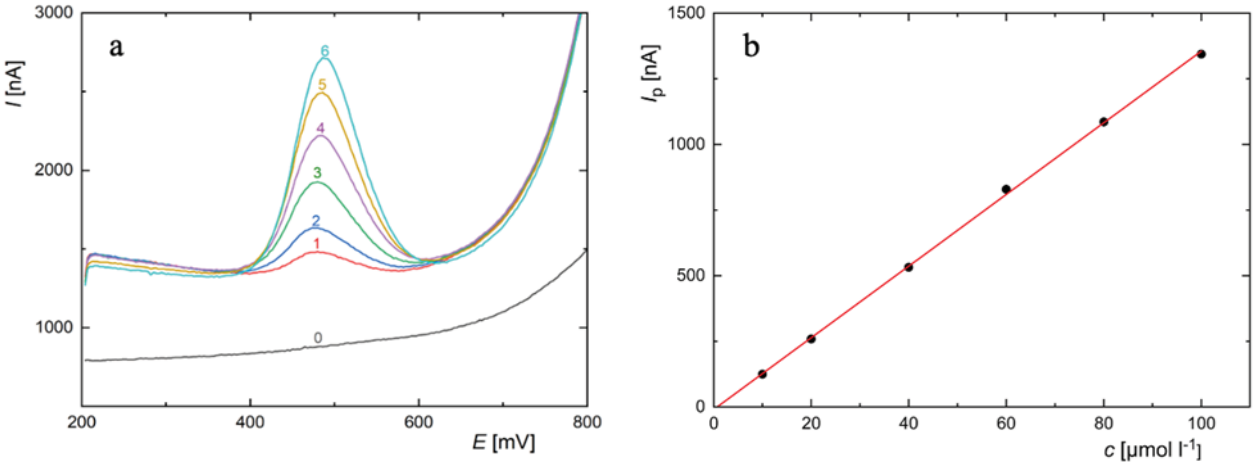
V ďalšej práci de Jesus Guedes a spol.[18] bol vyvinutý jednoduchý elektrochemický kit pre stanovenie desiatich liečiv s úzkym terapeutickým indexom, vrátane WAR. Využitá bola zostava BIA-MPA a sieťotlačová uhlíková elektróda (SPCE). Prostredím bol fosfátový tlmivý roztok o pH 7,0 s 10% obsahom etanolu. Pre WAR bola určená linearita v koncentračnom rozsahu 2–100 μmol l^{-1} a medza detekcie 0,07 μmol l^{-1}. Vyvinutá metóda umožňuje spoľahlivé stanovenie vo farmaceutických vzorkách s možnosťou miniaturizácie do prenosného zariadenia.

Modifikácia elektródy dokáže zabezpečiť väčší aktívny povrch, vyššiu elektrokatalytickú aktivitu a efektívnejší prechod elektrónov. Vďaka tomu poskytujú modifikované elektródy zlepšenie analytických vlastností, ako je zvýšenie citlivosti a zníženie medzí detekcie a stanoviteľnosti, rozšírenie lineárneho rozsahu stanovenia či zlepšenie opakovateľnosti. Častokrát sú vzorkami zložitejšie matrice, napr. moč alebo krv, kde dochádza k problémom s interferentami, ktorým sa dá predísť vhodnou modifikáciou elektródy, čím sa zvýši selektivita k cieľovému analytu. Príkladom je práca Taei a spol.[19], v ktorej bol vyvinutý senzor založený na CPE modifikovanej viacstennými uhlíkovými nanorúrkami a nanočasticami $ZnCrFeO_4$. V prostredí fosfátového tlmivého roztoku o pH 4,5 s obsahom chloridu sodného bol získaný širší lineárny koncentračný rozsah 0,02–920 μmol l^{-1}. Modifikáciou bola dosiahnutá vyššia vodivosť, lepšia citlivosť a nízka medza detekcie 0,003 μmol l^{-1}. Senzor bol aplikovaný na stanovenie v reálnych vzorkách komerčných tabliet, krvného séra a moču.

Keďže WAR je racemická zmes, niektoré štúdie sa zameriavajú na vývoj senzora na stanovenie enantiomérov. Na ich rozlíšenie bola CPE modifikovaná 3,4,9,10-perylénetetrakarboxylovou kyselinou, ktorá špecificky interaguje s enantiomérmi WAR. Lineárna závislosť koncentrácie bola získaná v rozsahu 5–160 μmol l^{-1} a medze detekcie boli 3,09 μmol l^{-1} pre *R*-WAR a 4,02 μmol l^{-1} pre *S*-WAR. Metóda bola aplikovaná na stanovenie v krvnej plazme a v moči s výťažnosťou 97,1–102,9 % (cit.[20]).

Príkladom potenciometrického stanovenia WAR je práca Saeedi a spol.[21], ktorá sa zaoberá vývojom elektrochemického senzora založeného na iónovo-selektívnej elektróde (ISE) pre priame stanovenie warfarínu v krvi. Cieľom štúdie bolo vyvinúť senzor vhodný pre POC zariadenie umožňujúce rýchle a citlivé stanovenie bez nutnosti predúpravy vzorky. Vyvinutý senzor obsahoval membránu z polyvinylchloridu s tetradodecylammonium chloridom ako aniónovým meničom. Merania prebiehali vo fosfátovom tlmivom roztoku o pH 7,4 a vo vzorkách celkovej krvi. Vyvinutý senzor preukázal vysokú citlivosť s medzou detekcie 0,125 μmol l^{-1} vo fosfátovom tlmivom roztoku, resp. 14,1 μmol l^{-1} v krvi. Senzor vykazoval rýchlu odozvu, dobrú opakovateľnosť a vysokú selektivitu voči interferujúcim iónom, chloridom a salicylátom.

V rámci prác[22,23] bolo študované elektrochemické chovanie WAR na SPCE a kompozitnej elektróde z ultračistého grafitu (UTGE). Na SPCE bola vyvinutá metóda pre stanovenie WAR pomocou techník DC voltampérometrie (DCV) a diferenčnej pulznej voltampérometrie (DPV). V prostredí Brittonovho-Robinsonovho (BR) tlmivého roztoku o pH 7,0 bola pre obe techniky získaná lineárna závislosť v rozsahu koncentrácií 4–10 a 10–100 μmol l^{-1}. Vyššia citlivosť sa potvrdila pre pulznú techniku DPV, pre ktorú bola medza detekcie 0,26 μmol l^{-1}, zatiaľ čo pre DCV bola 1,1 μmol l^{-1}. Ako príklad je na obr. 4 uvedený záznam voltampérogramov a príslušnej koncentračnej závis-

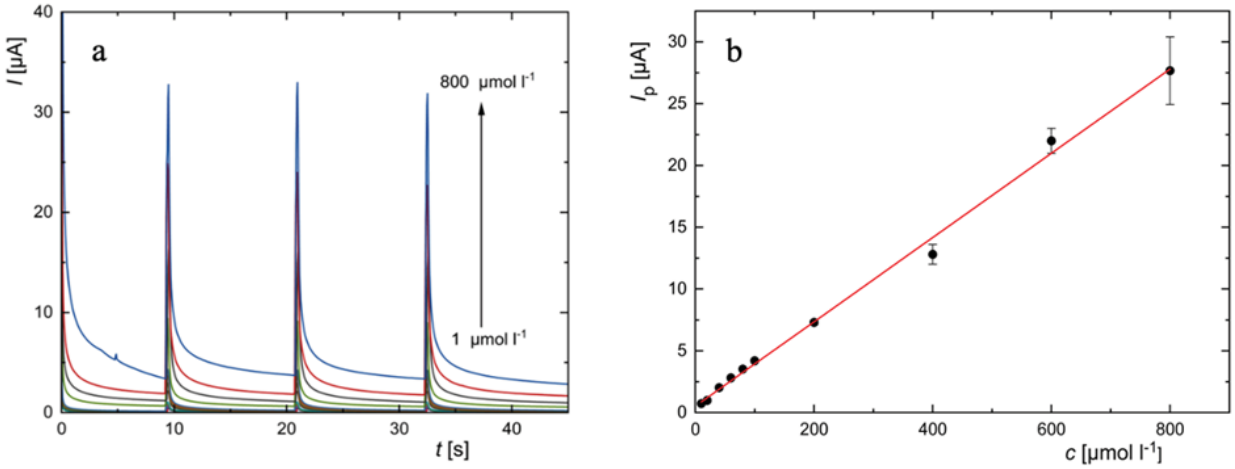


Obr. 4. **(a) DP voltampérogramy WAR o koncentráciách 0 (0), 10 (1), 20 (2), 40 (3), 60 (4), 80 (5) a 100 (6) μmol l^{-1} na SPCE v prostredí BR tlmivého roztoku o pH 7,0. (b) Kalibračná závislosť výšky píku (I_p) na koncentrácii WAR.** Parametre DPV: rýchlosť nárastu potenciálu 20 mV s^{-1}, výška pulzu 50 mV, šírka pulzu 100 ms (prúd vzorkovaný posledných 20 ms), perióda pulzu 150 ms (cit.[22])

losti na SPCE pomocou techniky DPV (cit.[22]). V ďalšej metóde bola využitá UTGE spolu s technikou DPV. V prostredí BR tlmivého roztoku o pH 8,0 bola získaná lineárna koncentračná závislosť v rozsahu 8–200 μmol l^{-1}. Medza detekcie bola určená na 0,84 μmol l^{-1} (cit.[23]).

V rámci ďalšieho vývoja bola SPCE využitá v kombinácii so vsádzkovou injekčnou analýzou s ampérometrickou detekciou (BIA-AD). Za optimálnych podmienok bola získaná lineárna koncentračná závislosť v rozsahu 1–800 μmol l^{-1} a bola určená medza detekcie 2,0 μmol l^{-1}. Na obr. 5 sú uvedené ampérogramy koncentračnej závislosti. Kľúčovou výhodou tejto metódy je rýchla odpoveď a jednoduchá manipulácia, čo ju robí mimoriadne vhodnou pre aplikáciu v praxi. Všetky vyvinuté metódy boli úspešne aplikované na stanovenie obsahu účinnej látky WAR v tabletách, čo potvrdilo ich využiteľnosť pre farmaceutickú analýzu[23].

Prehľad elektrochemických metód stanovenia WAR je uvedený v tab. I. Výsledky ukazujú, že elektrochemické metódy poskytujú rýchle a citlivé možnosti stanovenia WAR v rozličných typoch vzoriek. Kombinácia s rôznymi materiálmi a detekčnými technikami umožňuje ich ďalší rozvoj a širšie uplatnenie v oblasti analytickej chémie.



Obr. 5. **(a) Ampérogramy zaznamenané technikou BIA-AD na SPCE v prostredí BR tlmivého roztoku o pH 7,0 pre rozsah koncentrácií roztoku WAR 1–800 μmol l^{-1}. (b) Kalibračná závislosť výšky píku (I_p) na koncentrácii WAR;** chybové úsečky pre n = 3. Parametre BIA-AD: detekčný potenciál +1,0 V, dávkovaný objem 60 μl, rýchlosť dávkovania 286,3 μl s^{-1} (cit.[23])

Tabuľka I
Prehľad elektrochemických metód stanovenia WAR

Pracovná elektróda	Technika	Prostredie	Lineárny rozsah [μmol l^{-1}]	*LOD* [μmol l^{-1}]	Reálne vzorky	Lit.
CPE	DPV	FP (pH 4,5)	30–3000	0,315	tablety	16
HMDE	SWAdCSV	BRP (pH 5,0)	0,005–0,4	0,00065	tablety, sérum, moč	24
Fe_3O_4/CPE	SWAdASV	FP (pH 6,0)	0,5–1000	0,21	tablety, sérum, moč	9
$MnFe_2O_4$/MWCNT/CPE	DPV	FP (pH 4,0)	0,1–440,0	0,08	tablety, injekčný roztok, sérum, moč	25
$ZnCrFeO_4$/MWCNT/CPE	DPV	FP (pH 4,0)	0,02–920,0	0,003	tablety, sérum, moč	19
β-CD/MWCNT/Co_3O_4NP/CPE	DPV	FP (pH 5,0)	0,05–150	0,02	moč, sérum	26
CdS-QD/CS/MWCNT/GCE	DPSV	FP (pH 2,0)	0,05–80	0,0085	moč, sérum, materské mlieko	27
Co_xO_y-NP/MWCNT/GCE	DPAdSV	FP (pH 6,0)	0,008–50 50–800	0,0033	moč, plazma	28
PTCA/CBPE	DPV	BRP (pH 7,0)	5–160	3,09 (*R*-WAR) 4,02 (*S*-WAR)	moč, plazma	20
Ni_3C/CPE	DPV	FP (pH 6,0)	0,008–1,5	0,0021	–	29
NiPILNF/GCE	SWV	FP (pH 7,0)	1–100	0,15	tablety	30
MIP/NPGL/GE	CV	FP (pH 7,5)	0,0001–0,08	0,00041	krv	31
$PrAlO_3$-NP/GCE	CV	FP (pH 7,2)	19,5–5000	19,5	voda	32
ISE	potenciometria	FP (pH 7,4)	0,316–1000	0,125	krv	21
BDDE	BIA-MPA	FP (pH 7,0)	2–400	0,36	tablety	17
BDDE	FIA-MPA	FP (pH 7,0)	4–400	0,51	tablety	17
SPCE	BIA-MPA	FP (pH 7,0)	2–100	0,07	tablety	18
SPCE	DCV	BRP (pH 7,0)	4–100	1,05	tablety	22
SPCE	DPV	BRP (pH 7,0)	4–100	0,26	tablety	22
UTGE	DPV	BRP (pH 8,0)	8–200	0,84	tablety	23
SPCE	BIA-AD	BRP (pH 7,0)	1–800	2,0	tablety	23

Skratky nedefinované v predchádzajúcom texte: *LOD* – medza detekcie; FP – fosfátový tlmivý roztok (pufor); HMDE – visiaca ortuťová kvapková elektróda; SWAdCSV – square wave adsorpčná katodická rozpúšťacia voltampérometria; BRP – Brittonov-Robinsonov tlmivý roztok (pufor); Fe_3O_4/CPE – uhlíková pastová elektróda modifikovaná nanočasticami Fe_3O_4; SWAdASV – square wave adsorpčná anodická rozpúšťacia voltampérometria; $MnFe_2O_4$/MWCNT/CPE – uhlíková pastová elektróda modifikovaná viacstennými uhlíkovými nanorúrkami a $MnFe_2O_4$; $ZnCrFeO_4$/MWCNT/CPE – uhlíková pastová elektróda modifikovaná viacstennými uhlíkovými nanorúrkami a $ZnCrFeO_4$; β-CD/MWCNT/Co_3O_4-NP/CPE – uhlíková pastová elektróda modifikovaná β-cyklodextrínom, viacstennými uhlíkovými nanorúrkami a nanočasticami Co_3O_4; CdS-QD/CS/MWCNT/GCE – sklovitá uhlíková elektróda modifikovaná chitosanovým filmom a viacstennými uhlíkovými nanorúrkami s kovalentne imobilizovanými kvantovými bodkami; DPAdSV – diferenčná pulzná adsorpčná rozpúšťacia voltampérometria; Co_xO_y-NP/MWCNT/GCE – sklovitá uhlíková elektróda modifikovaná nanočasticami oxidu kobaltu a viacstennými uhlíkovými nanorúrkami; PTCA/CBPE – pastová elektróda z uhlíkovej černe modifikovaná 3,4,9,10-perylén-tetrakarboxylovou kyselinou; Ni_3C/CPE – uhlíková pastová elektróda modifikovaná karbidom niklu; NiPILNF/GCE – sklovitá uhlíková elektróda modifikovaná nanokompozitom poly(MImEO8BS)-Ni a Nafionu; MIP/NPGL/GE – zlatá elektróda s molekulárne imprintovaným polymérom na nanoporéznom zlatom filme; CV – cyklická voltampérometria; $PrAlO_3$-NP/GCE – sklovitá uhlíková elektróda modifikovaná perovskitovými nanočasticami.

4. Záver

Warfarín má aj po zavedení nových generácií perorálnych antikoagulancií kľúčový význam v antikoagulačnej terapii. Jeho úzky terapeutický index si však vyžaduje presné sledovanie koncentrácie v krvi, pretože bez spoľahlivej kontroly dávky hrozí riziko závažného krvácania alebo naopak nedostatočná účinnosť terapie. Stanovenie warfarínu v biologických a farmaceutických vzorkách je kľúčové pre zabezpečenie bezpečnej a účinnej liečby.

Tento referát poskytuje prehľad vyvinutých elektrochemických metód a ich aplikácií pre stanovenie warfarí-

nu. Elektrochemické metódy sa vyznačujú vysokou citlivosťou, jednoduchou manipuláciou, nízkymi prevádzkovými nákladmi a rýchlou analýzou, vďaka čomu sa ukazujú pre stanovenie warfarínu ako ideálny nástroj. Vďaka moderným elektródovým materiálom a využitiu pokročilých detekčných techník umožňujú tieto metódy selektívne a presné stanovenie warfarínu aj v komplexných biologických matriciach. Možnosť miniaturizácie elektrochemických systémov navyše umožňuje ich využitie v point-of-care (POC) zariadeniach pre rýchlu analýzu warfarínu *in situ*. Tieto metódy tak nachádzajú široké uplatnenie v klinickej praxi pri monitorovaní liečby, ale aj pri kontrole kvality farmaceutických preparátov.

Táto práca bola vypracovaná v rámci Špecifického vysokoškolského výskumu (projekt SVV 260793).

LITERATÚRA

1. Pirmohamed M.: Brit. J. Clin. Pharmacol. *62*, 509 (2006).
2. Ufer M.: Clin. Pharmacokinet. *44*, 1227 (2005).
3. Dimitrokalli E., Fertaki S., Lykouras M., Kokkinos P., Orkoula M., Kontoyannis C.: Molecules *26*, 6631 (2021).
4. Tadros R., Shakib S.: Aust. Fam. Physician *39*, 476 (2010).
5. Soyata A., Nur Hasanah A., Rusdiana T.: Indones. J. Pharm. *2*, 69 (2020).
6. Elango K., Javaid A., Khetarpal B. K., Ramalingam S., Kolandaivel K. P., Gunasekaran K., Ahsan C.: Cells *10*, 773 (2021).
7. Mathur A., Sharma A.: Asian J. Pharm. Clin. Res. *17*, 80 (2024).
8. Vinogradova Y., Coupland C., Hill T., Hippisley-Cox J.: Br. Med. J. *362*, k2505 (2018).
9. Gholivand M. B., Torkashvand M., Yavari E.: Mater. Sci. Eng. C *48*, 235 (2015).
10. Drague A., Escal J., Bidat C., Dellinger S., Hodin S., Duband S., Feliu C., Delavenne X.: J. Pharm. Biomed. Anal. *257*, 116709 (2025).
11. Putriana N. A., Rusdiana T., Rostinawati T., Nurfuadah I.: J. Pharm. Bioall. Sci. *16*, 44 (2024).
12. AlSawy N. S., ElKady E. F., Mostafa E. A.: J. Chromatogr. Sci. *62*, 380 (2024).
13. von Törne W. J., Klyk-Seitz U.-A., Piechotta C.: Environ. Sci. Pollut. Res. *31*, 16986 (2024).
14. Li J., Wu S., Shi X., Cao Y., Hao H., Wang J., Han Q.: Langmuir *41*, 1694 (2025).
15. *Warfarinum natricum*, *Český lékopis*. Státní ústav pro kontrolu léčiv, Praha 2023.
16. Hashemi M., Rahimnejad M., Ezoji H.: Monatsch. Chem. *155*, 29 (2024).
17. de Jesus Guedes T., Antônio Reis Andrade G., Barbosa Lima A.: Electroanalysis *29*, 2340 (2017).
18. de Jesus Guedes T., Pio dos Santos W. T.: Electroanalysis *30*, 1740 (2018).
19. Taei M., Abedi F.: Chin. J. Catal. *37*, 436 (2016).
20. Zilberg R. A., Maistrenko V. N., Zagitova L. R., Guskov V. Y., Dubrovsky D. I.: J. Electroanal. Chem. *861*, 113986 (2020).
21. Saeedi I., Ahmadi S., Thompson M., Hashemi P., Ramezani Z.: Chemosensors *10*, 44 (2022).
22. Žužičová V.: *Voltampérometrické stanovenie warfarínu na sieťotlačovej uhlíkovej elektróde*. *Bakalárska práca*. Univerzita Karlova, Praha 2023.
23. Žužičová V.: *Využitie voltampérometrie a ampérometrie pri stanovení warfarínu*. *Diplomová práca*. Univerzita Karlova, Praha 2025.
24. Ghoneim M. M., Tawfik A.: Anal. Chim. Acta *511*, 63 (2004).
25. Taei M., Hasanpour F., Basiri F., Tavakkoli N., Rasouli N.: Microchem. J. *129*, 166 (2016).
26. Gholivand M.-B., Solgi M.: Anal. Chim. Acta *1034*, 46 (2018).
27. Gholivand M. B., Mohammadi-Behzad L.: Mater. Sci. Eng. C *57*, 77 (2015).
28. Gholivand M. B., Solgi M.: Electrochim. Acta *246*, 689 (2017).
29. Torkashvand M., Gholivand M. B., Taherpour A., Boochani A., Akhtar A.: J. Pharm. Biomed. Anal. *139*, 156 (2017).
30. Molaakbari E., Mostafavi A., Beitollahi H., Tohidiyan Z.: Talanta *171*, 25 (2017).
31. Li Y., Zhang L., Liu J., Zhou S.-F., Al-Ghanim K. A., Mahboob S., Ye B.-C., Zhang X.: RSC Adv. *6*, 43724 (2016).
32. Ansari A. A., Alam M.: Biosensors *12*, 92 (2022).

V. Žužičová and V. Vyskočil *(Charles University, Faculty of Science, Department of Analytical Chemistry, UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry, Prague, Czech Republic):* **Application of Electrochemical Analytical Methods in the Determination of the Drug Warfarin**

Warfarin is an anticoagulant drug with a narrow therapeutic index. Its accurate determination is essential to ensure effective and safe treatment, as even small deviations can lead to serious adverse effects. A wide range of analytical methods have been developed for its determination, including spectrometric and separation techniques. Electrochemical methods are characterized by simple experimental setups and low costs, while enabling rapid analysis with high sensitivity and acceptable selectivity. Owing to these advantages, they represent an effective alternative for determining drugs and are used in clinical diagnostics, drug quality control, and environmental analyses of drug metabolites. This review discusses the physicochemical and biological properties of warfarin and compares various analytical approaches to its determination, with an emphasis on electrochemical methods.

Full text English translation is available in the on-line version.

Keywords: electrochemistry, drug analysis, warfarin, anticoagulants, voltammetry, amperometry

Acknowledgements
This research was carried out within the framework of the Specific Charles University Research (SVV 260793).

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Full text English translation available in the on-line version (click here)

Referát

www.chemicke-listy.cz

O HOŘKÉM HOŘCI A HOŘKÉM HOŘEČKU

Michal Jurášek a Pavel Drašar

Ústav chemie přírodních látek, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republika
drasarp@vscht.cz

Došlo 3.9.25, přijato 25.9.25.

Článek přináší základní informace o biologicky aktivních látkách z hořců v tradiční i soudobé léčitelské praxi a o uplatnění hořců ve východní medicíně, přináší též informace o intenzitě hořkosti některých obsahových sloučenin.

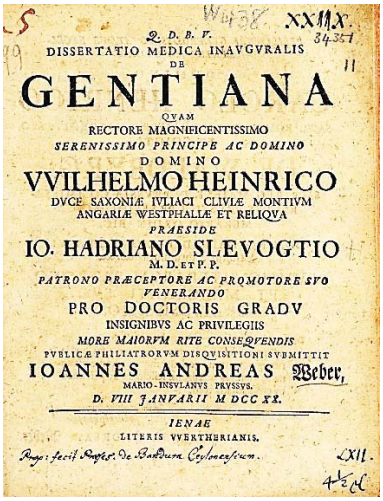
Klíčová slova: hořec, hořeček, *gentiana*, *gentianella*, TCM, ayurveda

Gentiana Linn. je největší rod v čeledi hořcovitých a zahrnuje více než 360 druhů, včetně v Čechách a na Slovensku „vyhubeného“ (cit.[1]) a posléze „nepůvodního“ hořce žlutého (*Gentiana lutea* L., též hořec velký, gelber Enzian), který je významným zástupcem hořců mezi léčivými bylinami, stejně jako některé asijské druhy. Jeho kořen je využíván ve farmacii (oficiální droga je uvedena v Evropském lékopisu Ph. Eur. 11. (cit.[2]) pod názvem *Radix gentianae*, uvedena je tam i *Gentianae tinktura,* ba i v lékopisu Českém 1997 (cit.[3]). Tradičně je používán v bylinném léčitelství při zažívacích poruchách. Tlumí dyspeptické projevy při poruchách funkce žlučníku, jater a slinivky. Podporuje krvetvorbu, funkce centrální nervové soustavy a dá se využít jako celkové tonikum při rekonvalescenci po těžkých chorobách. Zevně může být droga použita na nehojící se a zduřelé rány. Dokonce byla indikována kravám na zlepšení kvality mléka[4].

Jak praví Všemír Berchtold[5]: „*Gméno, české nosj pro hořkost swau; latinské ale má na památku Gentiana krále illirského čili slowanského*“ (Správně Gentios (řecky: Γένθιος, albánsky: Genti) byl ilyrský král z kmene Labeatů. Vládl v letech 181–168 př. n. l. a údajně objevil blahodárné účinky hořce[6]).

Nejstarším autorům známým univerzitním dokumentem, popisujícím hořec, je doktorská disertační práce Webera Johanna Andrease z roku 1720 z University v Jeně, která se nicméně opírá o všechny klasiky, jako byli Dioscorides, Plinius, Galenus, Matthioli a další. Tato práce se již ve své době zabývala mj. faktem, že tehdy známá literatura nebyla v určování rostlin příliš přesná a obsahovala mnoho různých názvů pro jednu rostlinu, a naopak jeden název pro rostliny různé. Někteří taxonomové v minulosti totiž spojovali i rody *Gentianella* (hořeček) a *Gentiana*

Obr. 1. **Hořec žlutý[7], hořeček[8], hořec (modrý)[9]**


Q. D. B. V.
DISSERTATIO MEDICA INAVGVRALIS
DE
GENTIANA
QVAM
RECTORE MAGNIFICENTISSIMO
SERENISSIMO PRINCIPE AC DOMINO
DOMINO
VVILHELMO HEINRICO
DVCE SAXONIÆ IVLIACI CLIVIÆ MONTIVM
ANGARIÆ WESTPHALIÆ ET RELIQVA
PRÆSIDE
IO. HADRIANO SLEVOGTIO
M. D. ET P. P.
PATRONO PRÆCEPTORE AC PROMOTORE SVO
VENERANDO
PRO DOCTORIS GRADV
INSIGNIBVS AC PRIVILEGIIS
MORE MAIORVM RITE CONSEQVENDIS
PVBLICÆ PHILIATRORVM DISQVISITIONI SVBMITTIT
IOANNES ANDREAS Weber,
MARIO-INSVLANVS PRVSSVS.
D. VIII IANVARII M DCC XX.
IENAE
LITERIS VVERTHERIANIS.

Obr. 2. **Frontispice Weberovy disertace**

Obr. 3. **Horec borovička a Horec vodka (Prelika, a.s. Prešov)**

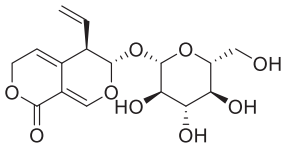
(hořec), v současné taxonomii jsou však řazeny do odlišných podkmenů a nejsou bezprostředně příbuzné[10].

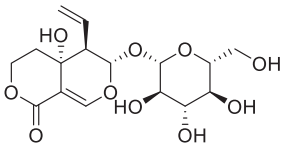
Turista se zajisté pamatuje na horské chaty na Slovensku, kde se téměř všude u nálevního pultu setkal s pětilitrovou sklenicí od okurek plnou kořenů hořce zalitých borovičkou[11] či jinou kořalkou. Tento elixír, nazývaný „koreňovica“ osvěžil, a jak je psáno výše i oléčil turistu na těle i na duši. Kořen se používal k výrobě lihovin i po fermentaci[12], nejen po maceraci[13]. Kořen hořce je častou součástí hořkých alkoholických specialit, jako vermuty, aperitivy, likéry (Jägermeister), amary (Fernet-Branca), či „bitters“ (Angostura bitters)[14]. Jak píše Presl[15]: „*Dělají z něho nápoj líhový i ohořčují jím kořalky a rosolky. Též jej dáwají do piwa na místo chmele*.“ Před časem jsme dokonce v tomto časopise přinesli originální předpis na výrobu Becherovky podle Jana Bechera z roku 1866, kde je kořen hořce jednou z hlavních surovin[16].

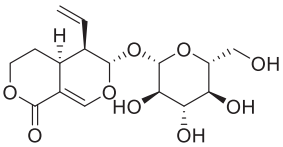
V dnešním Slovensku se prodává borovička a vodka (a řada dalších specialit) s příchutí hořkého extraktu kořene hořce. Je to o to zajímavější, že gentiopikrosid v hořci obsažený může být použit při léčbě alkoholické hepatosteatózy (ztučnění jater)[17,18].

Hlavními složkami lékopisné[3] suroviny (*Radix gentianae*; usušené úlomky kořenů a oddenků hořce) jsou hořké* sekoiridoidy gentiopikrosid (gentiopikrin; 2–8 %, někdy až téměř 10 %), swerosid (0,05–0,08 %)), amarogentin (0,01–0,08 %), swertiamarin (swertiamarosid, swertimarin) a příbuné amaropanin a amaroswerin, deglukosyltriflorosid a desacetylcentapikrin.

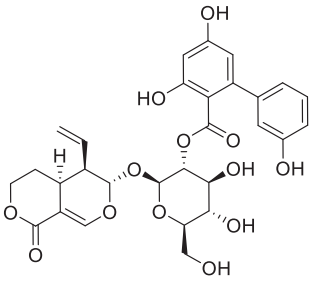
Zřejmě vůdčí sloučeniny ve vyvolání pocitu hořkosti jsou amarogentin[19] (hořkost 58 000 000, cit.[20]) a amaroswerin (hořkost 58 000 000, cit.[21]); k hořkosti dále přispívají amaropanin (hořkost 20 000 000, cit.[21]), desacetylcentapikrin (hořkost ca. 4 000 000, cit.[22]), sekoiridoidy gentiopikrin (hořkost 12 000, cit.[23]) a swerosid (hořkost ca. 12 000, cit.[20]). Nejvíce zastoupená hořká komponenta, gentiopikrosid (hořkost 11 600), má reálnou možnost přispět k léčbě různých onemocnění, včetně poruch zažívacího traktu, maligních změn, neurologických poruch, mikrobiálních infekcí, poruch tvorby kostí, zánětlivých stavů a dalších[24].


gentiopikrosid

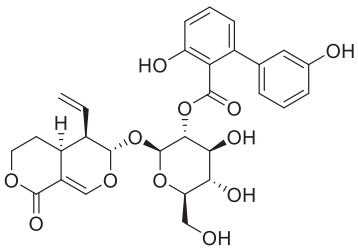

swertiamarin


swerosid

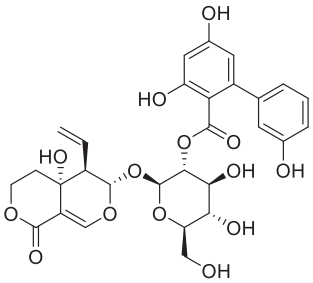
* Hořkost se obvykle určuje porovnáním hořkosti látky se známým standardem, často chinin-hydrochloridem (hořkost 200 000) a je vyjádřena jako reciproční ředění, které stále vytváří detekovatelnou hořkou chuť (EDQM. European Pharmacopoeia, 10th ed.; EDQM: Strasbourg, France, 2019). Hodnota hořkosti 1000 znamená, že 1 g látky nebo extrakt 1 g léčiva v 1000 ml vody chutná ještě hořce. Hořkost v tomto smyslu není identická s hodnotami IBU či EBU u piva (Verhoef B.: Velká encyklopedie piva, Rebo, Čestlice 2003).



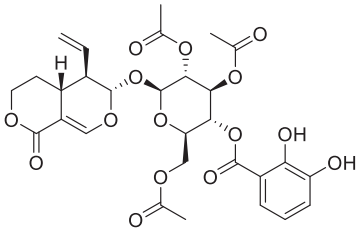
amarogentin



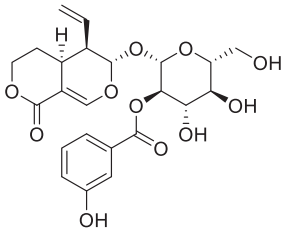
amaropanin



amaroswerin

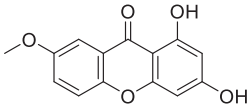


deglukosyltriflorosid

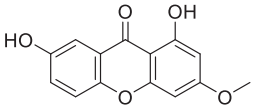


desacetylcentapikrin

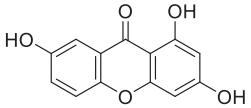
Mezi další složky patří xanthony (až 0,1 %), jako je gentisin (gentianová kyselina, gentianin), isogentisin, methylgentisin (série zejména lékařských a farmaceutických zdrojů popisují tuto látku názvem, ale neříkají, která z obou hydroxyskupin gentisinu je methylována, SciFinder takový triviální název neregistruje, jediná dohledatelná citace[25] látky ani struktury gentiseinu a 1-hydroxy-3,7-dimethoxyxanthonu neuvádí.)



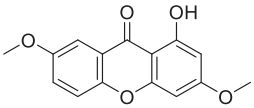
isogentisin



gentisin



gentisein

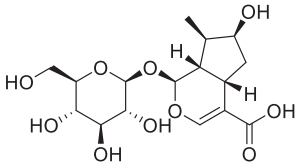


1-hydroxy-3,7-dimethoxyxanthon

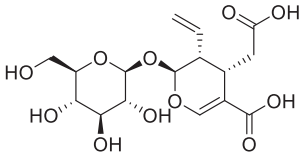
Další větší skupinou jsou iridoidy, kyselina loganová (loganinová) a sekologanosid.

Přítomny jsou také flavonoidy jako luteolin (cyanidenon, digitoflavon, flacitran, luteolol, Weld lake, Yama Kariyasu), apigenin, isovitexin (homovitexin, apigenin-6-*C*-β-D-glukosid, avrosid, isoavrosid, saponaretin), fytosteroly a esenciální olej (0,1–0,2 %).

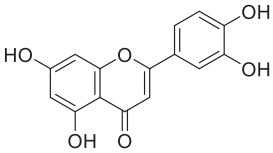
Sušené kořeny obsahují 30–55 % sacharidů, jako jsou monosacharidy (D-glukosa a D-fruktosa), disacharidy (sacharosa a gentiobiosa), trisacharidy (gentianosa 2,5–8,0 %) a polysacharidy (pektiny).



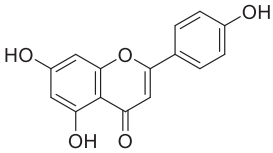
loganová kyselina



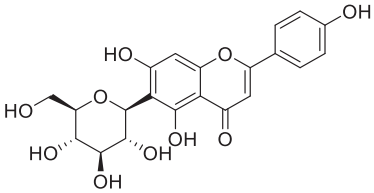
sekologanosid



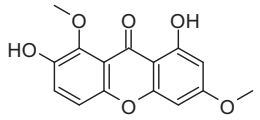
luteolin



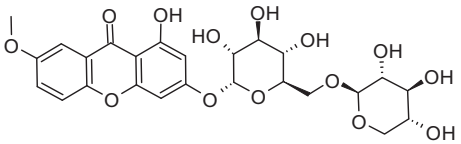
apigenin



isovitexin



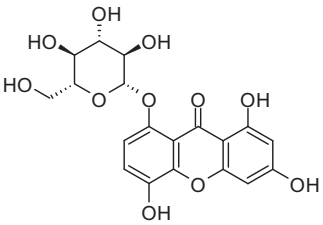
gentiakaulein



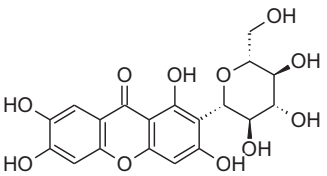
gentiosid

Kořen hořce lékopisné kvality musí mít hodnotu hořkosti nejméně 10 000 a musí také obsahovat nejméně 33 % ve vodě rozpustného extraktu (Evropský lékopis 2010)[26].

Klasická ayurveda používá oddenek himalajské *Gentiana kurroo* Royle[17] (indický či himalájský hořec, trāyamāṇa, त्रायमाण), který obsahuje zejména gentisin, swertiamarin, gentiopikrosid (hlavní komponenta), amarogentin, swerosid, látky, obsažené v našem *Radix gentianae*. Jako látky specifické pro trāyamāṇu (které se nalézají i v jiných drogách) můžeme jmenovat gentiakaulein (gentiakaulen), gentiosid, norswertianolin (demethylbellidifolin-8-*O*-glukosid), mangiferin[27].



norswertianolin



magniferin

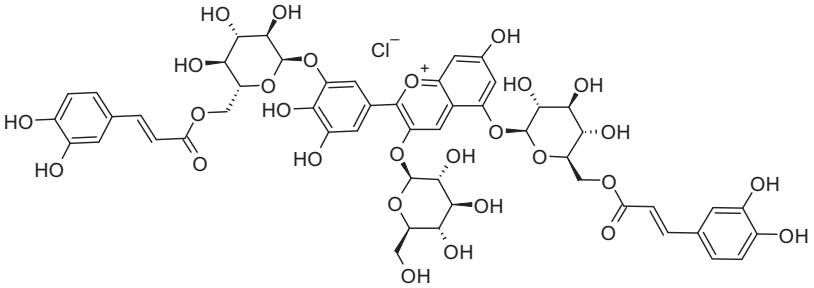
Ayurveda používá trāyamāṇu jako princip chladivý (śīta) a sladký (madhura), tlumící gulmu (falešné břišní bulky způsobené nadýmáním, lépe řečeno nerovnováhou tří dóši (vata, pitta a kapha)), horečky, poškozenou kaphu (ta ovlivňuje zejména tělesné tekutiny, kosterní a svalovou strukturu) a krevní poruchy. Léčí závratě, žízeň, tuberkulózu, vyčerpání, otravy a zvracení[28].

Tradiční čínská medicína[29] používá oddenek hořce (*Gentianae macrophyllae radix*, GMR, qin jiao, 秦艽) jako tradiční čínskou drogu střední třídy s účinky rozptylování vlhkosti způsobené větrem, odstraňování vlhkého tepla, snižování nedostatku tepla a úlevy od bolesti. Byla použita k léčbě bolesti kloubů, mrtvice, dětské horečky a žloutenky způsobené vlhkým teplem atd. Vydání Čínského lékopisu z roku 2020 uvádí[30], že GMR je sušený kořen *Gentiana macrophylla* Pall. (se synonymy *Gentiana straminea* Maxim., *Gentiana crassi-caulis* Duthie ex Burk. nebo *Gentiana dahurica* Fisch). Liu a spol.[29] uvádějí 191 chemických sloučenin v GMR, z nichž hlavní byly uvedeny výše (gentiopikrosid je opět uváděn jako hlavní obsahová látka). Vidíme zde mj. 12 iridoidů, 50 sekoiridoidů, 8 polymerních iridioidů, 5 triterpenoidů oleananového a ursanového typu, 12 flavonoidů, 7 steroidů, 5 alkaloidů, převážně obsahujících pyridinové jádro, lignany, seskviterpeny a fenylpropanoidy.

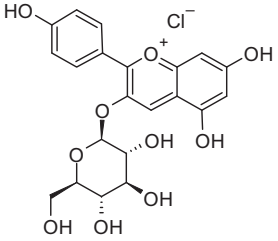
Moderní farmakologické studie ukázaly, že farmakologická aktivita GMR se projevuje především protizánětlivými účinky. Má také další aktivity, jako protinádorovou, hepatoprotektivní, imunoregulační a kardiostimulační.

Krásná modrá barva okvětních lístků většiny hořců je založena na charakteristické spektrální absorpci stabilního anthocyaninu, gentiodelfinu[31], s líbezným systematickým názvem 5-6-*O*-(2*E*)-3-(3,4-dihydroxyfenyl)-1-oxo-2--propen-1-yl-β-D-glukopyranosyloxy-2-3-6-*O*-(2*E*)-3-(3,4--dihydroxyfenyl)-1-oxo-2-propen-1-yl-β-D-glukopyranosyloxy-4,5-dihydroxyfenyl-3-(β-D-glukopyranosyloxy)-7-hydroxy-1-benzopyrylium-chlorid, který byl izolován ze zmíněných okvětních lístků ve výtěžku 0,01 % (cit.[32]).

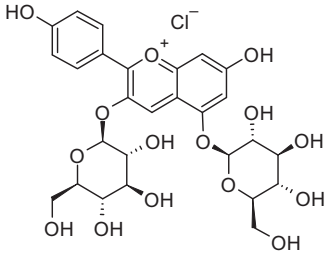
Za žlutou až oranžovou barvu *G. lutea* jsou zodpovědné karotenoidy[33], najmě pak β-karoten, za oranžový tón *G. lutea* L. var. *aurantiaca* pak anthocyaniny, jako pelargonidin-3-*O*-glukosid, pelargonidin-3,5-*O*-diglukosid



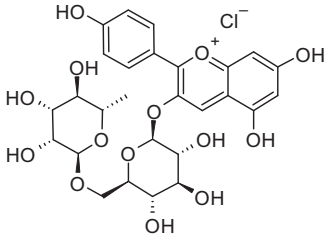
gentiodelfin



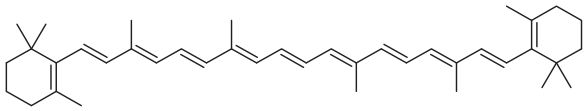
pelargonidin-3-*O*-glukosid



pelargonidin-3,5-*O*-diglukosid



pelargonidin-3-*O*-rutinosid



β-karoten

(pelargonin) a pelargonidin-3-*O*-rutinosid[34], samozřejmě ve formě solí.

Hořce a jejich „příbuzní“ představují nejen nádheru přírody, ale i léčivou sílu, kterou příroda moudře vložila do čarokrásných bylin tak, aby z nich moudří lidé měli užitek a radost.

Článek je součástí série příspěvků popisujících různé chemické aspekty problematiky přírodních látek, jako např. články[35–38].

LITERATURA

1. Presl S., Presl B.: *Flora čechica indicatis medicinalibus, oeconomicis technologicisque plantis = Kwětena česká : s poznamenánjm lékařských, hospodářských a řemeslnických rostlin*. J. G. Calve, Praha 1819.
2. European Pharmacopoeia Commission: *European Pharmacopoeia* (Ph. Eur.) 11. Deutscher Apotheker Verlag Dr. Roland Schmiedel GmbH & Co. KG, Stuttgart 2022.
3. *Český lékopis*, příloha k vyhlášce č. 1/1998 Sb.
4. Hansaman L. (ed.): *Negnowěgssj moravsko-slezský Domácj Přjtel Wsseužitečný občanský kalendář na rok obyčegný 1854*, číslo 1 str. 54. Winikr K., Brno 1854.
5. Berchtold B. V., Presl J. S.: *O přirozenosti rostlin aneb rostlinář, ustanowený pro lékaře, hogiče, hospodáře, umělce, řemeslňjky a wychowatele.* Jan Sw. Presl, Praha 1823.
6. https://www.britishmuseum.org/collection/term/BIOG186029, staženo 4. 8. 2025.
7. French School: *Gentiana lutea, Grande Gentiane*, v knize: *Collection of Botanical Studies*, ca 1820. Originál Oak Spring Garden Foundation Library, Upperville, Virginia.
8. Step E.: *Favourite Flowers of Garden and Greenhouse.*, Edward Step Artwork, London 1897.
9. Howard, Lady F.: *A catalogue of English plants drawn after nature by Lady Frances Howard*, 1766, Originál Oak Spring Garden Foundation Library, Upperville, Virginia.
10. Von Hagen K. B., Kadereit J. W.: Org. Divers. Evol. *1*, 61 (2001).
11. Jurášek M., Opletal L., Drašar P.: Chem. Listy *115*, 458 (2021).
12. Tasić S., Šavikin-Fodulović K., Menković N.: *Gentiana lutea*, v knize: *Guide through medicinal plants*. World Agency “Valjevac”, Valjevo, Serbia 2004.
13. Shaidullova O. V.: RU2545389 C1 (2015).
14. Camper E.: https://www.alcoholprofessor.com/blog-posts/bitter-botanicals-gentian, staženo 2. 8. 2025.
15. Presl J. S.: *Jana Swatopluka Presla Wšeobecný rostlinopis, čili, Popsání rostlin we wšelikém ohledu užitečných a škodliwých*, díl 2., str. 68. Kronbergr a Řivnáč, Praha 1846.
16. Opletal L., Čopíková J., Uher M., Lapčík O., Moravcová J., Drašar P.: Chem. Listy *101*, 895 (2007).
17. Choubey P., Sharma V., Joshi R., Upadhyaya A., Kumar D., Patial V.: J. Ethnopharmacol. *325*, 117866 (2024).
18. Li X., Zhang Y., Jin Q., Xia K.-L., Jiang M., Cui B.-W., Wu Y.-L., Song S.-Z., Lian L.-H., Nan J.-X.: Brit. J. Pharmacol. *175*, 1451 (2018).
19. Wagner H., Bladt C., Zgainski E. M., v knize: *Plant drug Analysis*, str. 125. Springer, Berlin 1983.
20. Evans W. C., Evans D.: *Chapter 24 - Miscellaneous isoprenoids*, v knize: *Trease and Evans' Pharmacognosy*, 16. vyd., str. 333–346. Elsevier, Saunders 2009.
21. https://www.pharma4u.de/pta/datenbanken/arzneipflanzen/detail/gentianae-radix/, staženo 1. 8. 2025.
22. Wichtl M. (ed.), Blaschek W. (ed.): *Wichtl – Teedrogen und Phytopharmaka Ein Handbuch für die Praxis*, 6. vyd. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 2016.
23. http://www.pharmakobotanik.de/systematik/6_droge/gentia-r.htm, staženo 1. 8. 2025.
24. Antoniadi L., Bartnik M., Angelis A., Wawruszak A. Halabalaki M., Kukula-Koch W., Skaltsounis L. A.: Cells *13*, 70 (2024).
25. von Kostanecki S., Tambor J.: Monatsh. Chem. *15*, 1 (1894).
26. Buchwald W., Mikołajczak P. Ł.: *Gentianae radix*

(Chapter 17), v knize: *The Gentianaceae – Volume 2*: *Biotechnology and Applications* (Rybczyński J. J., Davey M. R., Mikuła A., ed.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2015.
27. Wani B. A., Ramamoorthy D., Rather M. A., Arumugam N., Qazi A. K., Majeed R., Hamid A., Ganie S. A., Ganai B. A., Anand R., Gupta A. P.: Phytomedicine *20*, 723 (2013).
28. Wisdom Library, https://www.wisdomlib.org/definition/trayamana, staženo 5. 8. 2025.
29. Liu C., Song X., Sun Y., Li Y., Li X., Zhang D.: Nat. Prod. Res. *38*, 4446 (2024).
30. Chinese Pharmacopoeia Commission: *Pharmacopoeia of the People's Republic of China,* díl 1, 282 (2020).
31. Fukuchi-Mizutani M., Okuhara H., Fukui Y., Nakao M., Katsumoto Y., Yonekura-Sakakibara K., Kusumi T., Hase T., Tanaka Y.: Plant Physiol. *132*, 1652 (2003).
32. Yoshida K., Kondo T., Goto T.: Tetrahedron *48*, 4313 (1992).
33. Ji J., Wang G., Wang J., Wang P.: Biotechnol. Lett. *31*, 305 (2009).
34. Diretto G., Jin X., Capell T., Zhu C., Gomez-Gomez L.: PLoS One *14*, e0212062 (2019).
35. Podskalská T., Říhová K., Kružík V., Škorpilová T., Smutná V., Potančoková J., Čížková H.: Chem. Listy *117*, 23 (2023).
36. Jurášek M., Drašar P.: Chem. Listy *117*, 278 (2023).
37. Grbavčic M., Jurášek M., Drašar P.: Chem. Listy *118*, 448 (2024).
38. Šárka E., Caltová K., Smrčková P., Bleha R., Marek I., Fíla V., Lhotka M.: Chem. Listy *117*, 196 (2023).

M. Jurášek and P. Drašar *(Department of Chemistry of Natural Substances, University of Chemical Technology, Prague, Czech Republic):* **On Bitter Gentian and Bitter Gentianella**

The article provides basic information about biologically active substances from gentians in traditional and contemporary healing practice and about the use of gentian in Eastern medicine, and also provides information about the intensity of bitterness of some of the compounds contained.

Full text English translation is available in the on-line version.

Keywords: gentian, dwarf gentian, *gentiana*, *gentianella*, TCM, ayurveda

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Chemické Listy

Referát

www.chemicke-listy.cz

PATNÁCT LET SPOLUPRÁCE RADIOCHEMICKÉ LABORATOŘE ÚSTAVU MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY A 1. LÉKAŘSKÉ FAKULTY UNIVERZITY KARLOVY

Jan Kučka[a], Jana Humajová[c], Miroslav Vetrík[a], Jiří Pánek[a], Martin Hrubý[a], Marie Zadinová[c], Pavla Francová[b], Luděk Šefc[b] a Pavla Poučková[c]

[a] Ústav makromolekulární chemie AV ČR v.v.i., Heyrovského nám. 2/1888, 162 00 Praha 6, [b] Centrum pokročilého preklinického výzkumu (CAPI), 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, Salmovská 3, 120 00 Praha 2, [c] Ústav biofyziky a informatiky, 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, Salmovská 1, 120 00 Praha 2, Česká republika
jkucka@centrum.cz

Došlo 6.10.25, přijato 20.10.25.

Radiochemická laboratoř Ústavu makromolekulární chemie AV ČR vznikla roku 2009 s cílem rozvíjet syntézu a charakterizaci radioaktivně značených polymerů a nanočástic. Od počátku se ukázala nezbytnost úzké spolupráce s biologickými a medicínskými pracovišti 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy. Tento článek shrnuje patnáctiletou spolupráci od prvních pokusů na Ústavu biofyziky a informatiky až po současnou éru Centra pokročilého preklinického zobrazování (CAPI). Výsledkem jsou společné publikace, projekty a patenty s přesahem do medicíny. Text dále uvádí přehled technického vybavení, praktických požadavků na *in vivo* experimenty a ekonomických aspektů preklinického výzkumu.

Klíčová slova: radiofarmaka, radioaktivně značené sloučeniny, biodistribuce, biologické testování, zobrazovací metody

1. Úvod

Radiochemická laboratoř Ústavu makromolekulární chemie AV ČR (ÚMCH) byla založena v roce 2009 jako specializované pracoviště zaměřené na syntézu a charakterizaci radioaktivně značených polymerů, nanočástic a peptidů[1–6]; dále na vývoj radioznačených nanogelů[7] a CT-kontrastních (CT – výpočetní tomografie, angl. Computed Tomography) biokompatibilních gelů[8]. Od počátku byla zřejmá nutnost spolupráce s biologickými pracovišti, a proto byly navázány úzké vazby na 1. lékařskou fakultu Univerzity Karlovy (1. LF UK). Článek shrnuje 15 let spolupráce mezi Radiochemickou laboratoří ÚMCH a 1. LF UK — od počátečních kontaktů s Ústavem biofyziky přes vývoj léčiv na hemochromatózu a Wilsonovu chorobu, diagnostiku i terapii nádorů, až po současnou éru spolupráce s Centrem pokročilého preklinického zobrazování (CAPI).

2. Historie spolupráce

Vznik radiochemické laboratoře ÚMCH v roce 2009 umožnil využívat radionuklidy k experimentálnímu sledování polymerních nosičů a nanočástic vyvíjených na ÚMCH v biologických systémech. Byla navázána spolupráce s Ústavem biofyziky 1. LF UK, vedeným prof. MUDr. RNDr. Jiřím Benešem, CSc., kdy klíčovou roli sehrála doc. RNDr. Pavla Poučková, CSc., která otevřela cestu k biologickému testování. Pro efektivní spolupráci byla zásadní i role RNDr. Marie Zadinové, jež tým naučila manipulaci s laboratorními zvířaty a metody aplikace léčiv. Toto období představovalo „učební fázi“ spolupráce, během níž se vyvinuly základní metodiky biologického testování radioaktivních polymerů. Prvními z testovaných polymerů *in vivo* byly termoresponzivní polymery značené ^{131}I, které se ve formě roztoku aplikovaly do nádorů (karcinom prostaty, linie PC3, cit.[1]).

Testovaný poly(*N*-isopropylakrylamid) (PNIPAM) patří mezi termoresponzivní polymery, jejichž LCST (dolní kritická rozpouštěcí teplota, lower critical solution temperature) leží mezi laboratorní a tělesnou teplotou. Při přechodu z laboratorní teploty na teplotu lidského těla tak dojde k jeho fázové separaci z roztoku. Při podání *in vivo* se roztok polymeru rychle vysráží na hydrofobní gel, což umožňuje lokální retenci radioaktivní látky (depo), které je pak zvolna fyzikálně bioerodovatelné[1]. V této studii byl PNIPAM kovalentně funkcionalizován pro radiojodaci (značení ^{131}I, β, γ-zářič, $t_{1/2}$ = 8,02 dne). Funkcionalizace spočívala v kopolymeraci s *N*-methakroyl-L-tyrosinamidem (<1 mol %) umožňující elektrofilní radiojodaci na aromatickém jádře tyrosinamidu. Tím se z polymeru stal

stabilní radionosič vhodný pro intratumorální injekční aplikaci. Po intratumorálním podání ve zvířecím nádorovém modelu linie PC3 se ^{131}I–PNIPAM vysráží a vytvoří depotní strukturu. Ta minimalizuje difuzi radionuklidu mimo nádorovou masu a umožňuje cílené ozařování nádorových buněk v ložisku. Testováním *in vivo* bylo zjištěno, že při dávce 25 MBq došlo k regresi či úplné remisi tumoru; při 2 MBq byl pozorován pouze zpomalený růst[1]. Nepřítomnost lokálních zánětlivých a toxických reakcí a postupné vylučování polymeru naznačuje, že polymerní nosič je biokompatibilní a bioerodovatelný, přičemž radiojod zůstává pevně kovalentně vázán na polymer.

Závěrem lze říci, že ^{131}I-PNIPAM představuje slibný radionosič citlivý na vnější podněty (změnu teploty), který díky kombinaci termoresponzivity a radioaktivního izotopu nabízí jedinečnou možnost injekční a snadno dávkovatelné brachyterapie bez nutnosti chirurgické implantace a následného vyjmutí pevných zářičů.

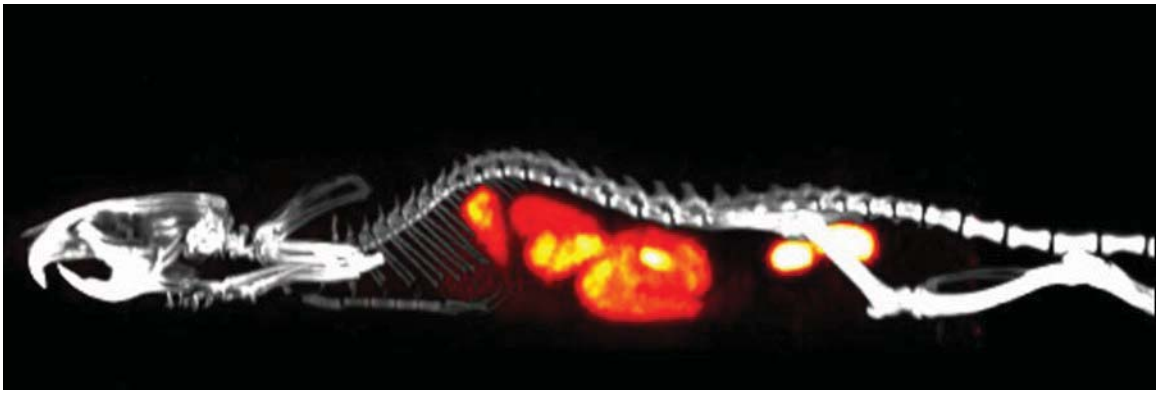
3. Rozvoj spolupráce

Rok 2012 znamenal posílení spolupráce nástupem MUDr. Jany Humajové (rozené Mattové) do doktorského studia na 1. LF UK. Její práce rozšířila výzkum směrem k farmakologickým aplikacím. Nejvýznamnějším výsledkem této etapy byl vývoj léčiva pro Wilsonovu chorobu a následně pro hemochromatózu[9–13]. Obě nemoci jsou způsobeny poruchou metabolismu, při níž se v organismu hromadí ionty mědi (Cu^{2+}, u Wilsonovy choroby)[9–11,13], respektive ionty železa (Fe^{2+}/Fe^{3+}, u hemochromatózy)[12]. Jejich vysoké koncentrace vedou k oxidačnímu stresu, nevratnému poškození orgánů a mohou mít i fatální následky.

Navržená polymerní chelatační léčiva představují posun od tradičních nízkomolekulárních ligandů (D-penicilamin, deferoxamin), které jsou zatíženy nízkou selektivitou, krátkým biologickým poločasem a významnými vedlejšími účinky. Vytvořené makromolekulární systémy využívají kovalentně zabudované specifické chelátory – zejména katecholové (1,2-dihydroxybenzen), pyrogallolové (1,2,3-trihydroxybenzen), 8-hydroxychinolinové a 1,10-fenantrolinové motivy. Tyto funkční skupiny poskytují multivalentní koordinační prostředí pro Cu^{2+} a Fe^{3+} a umožňují vznik stabilních komplexů. Polymerní nosiče byly konstruovány jako makroporézní síťované systémy nebo polysacharidové deriváty s vysokou hydrofilitou, což zajišťuje jejich retenci v gastrointestinálním traktu a omezuje systémovou absorpci. Tím se výrazně snižuje riziko toxicity – polymery fungují jako lokální sorbenty kovových iontů, které blokují jejich vstřebávání z potravy[9-13]. *In vivo* experimenty jako ^{64}Cu PET/CT (PET – pozitronová emisní tomografie, angl. Positron Emisson Tomography) potvrdily (viz obr. 1), že tyto systémy účinně snižují biologickou dostupnost železa a mědi, a to bez indukce cytotoxicity či prooxidačních účinků[9–13]. Nevstřebatelnost polymerů byla ověřena jejich radiojodací ^{125}I a následným sledováním pomocí SPECT/CT (SPECT – jednofotonová emisní výpočetní tomografie, angl. Single Photon Emisson Computed Tomography) *in vivo*. Navržené polymery jsou chráněny několika patenty na polysacharidové systémy se specifickými chelátory mědi a železa a představují perspektivní přístup k léčbě metabolických poruch kovů[11]. Tato etapa přinesla kromě patentů také nové publikace a grantové projekty, které dále upevnily vzájemnou spolupráci. Tento výzkum také ukázal potenciál polymerní chemie překonat limity nízkomolekulárních terapeutik.

4. Éra Centra pokročilého preklinického zobrazování (2015 – současnost)

V roce 2015 bylo na 1. LF UK založeno Centrum pokročilého preklinického zobrazování (CAPI) pod vedením RNDr. Luďka Šefce, CSc., s významným přispěním Ing. Pavly Francové. Špičkové přístrojové vybavení (PET, SPECT, MRI – magnetická rezonance, angl. Magnetic



Obr. 1. **PET/CT laboratorního potkana s radioizotopem ^{64}Cu aplikovaným žaludeční sondou.** Měď je patrná v celém zažívacím traktu a játrech. Její biologická dostupnost není limitována přítomností chelatujícího polymeru – přirozená biodistribuce u kontroly bez podání polymeru

Resonance Imaging, CT a další optické a ultrazvukové zobrazovací metody) umožnilo tomuto centru *in vivo* zobrazování biologických procesů, což výrazně posílilo společné projekty a umožnilo posun od základního výzkumu k preklinickým aplikacím. Spolupráce tak nabyla plně interdisciplinárního charakteru.

Společný výzkum se rozvíjel v několika směrech. Jedním z nich byl vývoj pokročilých termoresponzivních polymerů značených β-zářičem ^{90}Y, jejichž polymerní matrice byla funkcionalizována imunostimulačním polysacharidem β-glukanem a pro sledování biologického osudu doplněna fluorescenčním barvivem Dyomics 615 (cit.[14]). Tyto systémy spojují lokální depozici radionuklidu s aktivací imunitního systému, čímž dosahují synergického protinádorového efektu. Z chemického hlediska jde o funkcionalizované β-glukan-*graft*-poly(2-isopropyl-2-oxazolin-*co*-2-butyl-2-oxazolin)y s LCST přechodem mezi laboratorní a tělesnou teplotou, které po intratumorální aplikaci vytvářejí dočasně stabilní depot s navázaným ^{90}Y. Tím se dosahuje dlouhodobého ozáření nádorového ložiska včetně potlačení regulačních T_{reg} buněk chránících nádor před imunitní odpovědí při minimálním úniku radionuklidu do systémové cirkulace. Po vymření radionuklidu nastupuje imunomodulační efekt β-glukanu, který synergicky s radiací indukuje imunitní odezvu proti odumřelým zbytkům nádorové tkáně a tím i proti metastázám jinde v těle.

Další linií výzkumu byly polymerní nanočásticové a polymersomové nosiče chemoterapeutik, zejména doxorubicinu. Polymersom je nano- až mikrometrická vezikula vzniklá samouspořádáním amfifilních blokových kopolymerů ve vodě. Má dvojvrstvou polymerní membránu (jde o analogii liposomu), která je obvykle silnější a stabilnější než u liposomu, a umožňuje enkapsulovat hydrofilní látky do jádra a hydrofobní do membrány. Byly vyvinuty polymersomy citlivé na vnější podněty na bázi blokových kopolymerů, které reagují na změny pH, přítomnost vysokých hladin reaktivních forem kyslíku (ROS) v nádorovém mikroprostředí nebo kombinaci obou podnětů („AND gate“ multiresponzivní systémy[15–17]). V kyselém, nádorově specifickém mikroprostředí a/nebo pomocí ROS dochází k disociaci vezikul a zrychlenému uvolnění léčiva, zatímco ve fyziologických podmínkách (pH 7,4) zůstávají vezikuly stabilní. Tento přístup vede k vyšší akumulaci léčiva v nádoru, ke snížení jeho kardiotoxicity a prodloužené přežití experimentálních zvířat ve srovnání s volným doxorubicinem[18].

Významným směrem byl také výzkum polymerních radiosenzitizérů, konkrétně perfluoralkylovaných diselenidových nanočástic (tzv. fluorosomů)[19]. Tyto redoxně aktivní systémy katalyticky rozkládají H_2O_2 a oxidují intracelulární glutathion, čímž vyvolávají oxidativní stres a zvyšují citlivost nádorových buněk vůči ionizujícímu záření, zatímco zdravé buňky chrání. *In vivo* modely potvrdily, že kombinace diselenidových nanočástic s frakcionovanou radioterapií vede k úplnému potlačení růstu tumoru.

Současně probíhaly i práce na CT kontrastních gelech[8,20] a protetických materiálech (viz obr. 2), a také na studiu biologického osudu dceřiných radionuklidů alfa zářičů (^{225}Ac, ^{223}Ra) vázaných na nanočástice, což je zásadní pro bezpečné použití cílené terapie alfa zářiči[21,22]. Spolupráce zahrnuje i komplexní teranostické přístupy, například projekt zaměřený na vývoj léčiva cíleného na receptory FAP (angl. Fibroblast Activation Protein). Tento projekt spojuje diagnostickou zobrazovací složku s terapeutickým účinkem a je realizován ve spolupráci ÚMCH, Ústavu organické chemie a biochemie (ÚOCHB) a 1. LF UK.

5. Vybavení laboratoří

Radiochemická laboratoř ÚMCH má povolení k nakládání s radionuklidy ^{125}I, ^{131}I, ^{99m}Tc, ^{111}In a ^{90}Y. Je vybavena ionizačními komorami, scintilačními detektory NaI (Tl), HPLC systémy s radiodetektory (Berthold) a radioscannerem Typhoon 7000. Jak je specifikováno výše, pracoviště CAPI je vybaveno zobrazovacími systémy PET,

Obr. 2. **CT laboratorní myši s implantovaným gelem,** barevně je odlišena opacita implantátů

SPECT, MRI, CT a optickými modalitami. V blízké době má být rozšířeno o kombinované SPECT/MRI a spektrální CT. Zobrazovací systém Albira (výrobce Bruker) umožňuje například PET sledování nádorů pomocí [^{18}F]-fluorodeoxyglukosy (^{18}F-FDG) a SPECT zobrazování s využitím izotopů ^{125}I a ^{99m}Tc.

Toto rozdělení vybavení odpovídá koncepci: Příprava či radioznačení vzorků (včetně těch od spolupracujících skupin a ústavů) probíhá na ÚMCH, zatímco biologické testování na pracovištích 1. LF UK.

6. Praktické požadavky a etické aspekty preklinického výzkumu

Vzorky určené k *in vivo* aplikaci musí mít fyziologické pH a být izotonické. Jako pomocná rozpouštědla lze použít pouze malé množství ethanolu nebo dimethylsulfoxidu (maximálně do 10 %). U imunokompetentních zvířat nejsou vyžadovány absolutní sterilní podmínky, avšak biologická kontaminace vzorků je nepřípustná. Je možné implantovat polymerní implantáty přiměřené velikosti (válečky o průměru cca 5 mm v průměru; sterilní, fixované tkáňovým lepidlem) a jejich biologický osud (biodegradaci) sledovat pomocí CT, UZ (ultrazvukového zobrazování) nebo MRI.

Objemy aplikovaných léčiv a vzorků se liší podle druhu zvířete: u myší je to přibližně 100–150 µl intravenózně i subkutánně, stovky µl perorálně a jednotky až desítky µl intratumorálně či intramuskulárně. Používané modely zahrnují myši (kmeny C57BL/6, BALB/c, Nu/Nu, NOD), potkany (Wistar, Lewis) a jen výjimečně také králíky.

Každý experiment na obratlovcích vyžaduje schválený projekt pokusů na zvířatech (PP) v souladu se zákonem na ochranu proti týrání zvířat. Proces schvalování probíhá v gesci Ministerstva zemědělství České republiky a podle očekávané míry závažnosti pro laboratorní zvířata může trvat i několik měsíců. Welfare zvířat je zajištěno na vysoké úrovni; jde o podmínku získání nezkreslených výsledků bez zbytečného stresu pokusných zvířat i společenský požadavek a morální závazek.

7. Ekonomické a provozní aspekty

Preklinický výzkum je finančně náročný. Běžné laboratorní myši (např. kmenů C57BL/6 nebo BALB/c) stojí kolem 1 500 Kč; potkani (Wistar, Lewis) jsou o něco levnější, práce s nimi je však náročnější a existuje pro ně méně dostupných modelů onemocnění. Imunokompromitované kmeny (Nu/Nu, NOD) a geneticky modifikované myši stojí v řádu tisíců až desetitisíců korun a do nákladů je nutné zahrnout i ustájení zvířat. Hodina strojového času (PET/SPECT/CT, MRI) stojí řádově tisíce korun; u grantových projektů a při společných publikacích se náklady obvykle dělí mezi partnery.

8. Závěr a perspektivy

Spolupráce Radiochemické laboratoře ÚMCH a 1. LF UK se během patnácti let rozvinula od prvotního biologického testování radioaktivních polymerů na Ústavu biofyziky až k plně interdisciplinárním projektům v rámci CAPI. Výsledkem jsou desítky společných publikací a pět patentů a užitných vzorů s přímým přesahem do medicíny[16]. Do budoucna se předpokládá rozšíření spektra používaných radionuklidů i zavedení nových zobrazovacích modalit[17]. Spolupráce představuje modelový příklad propojení chemie, biologie a medicíny v ČR a zůstává výjimečný i celosvětově[18].

Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR (grant LUAUS24272, LUAUS24203 a projekt EATRIS-CZ, LM2023053), Ministerstvem zdravotnictví ČR (AZV, grant NW24-03-00387) a projektem Strategie AV21 (výzkumný program „Průlomové technologie budoucnosti – senzorika, digitalizace, umělá inteligence a kvantové technologie“, výzkumné téma „Nové korelativní techniky pro analýzu a zobrazování biologických a syntetických polymerních materiálů“).

LITERATURA

1. Hruby M., Pouckova P., Zadinova M., Kucka J., Lebeda O.: Eur. J. Pharm. Sci. *42*, 484 (2011).
2. Kostiv U., Lobaz V., Kučka J., Švec P., Sedláček O., Hrubý M., Janoušková O., Francová P., Kolářová V., Šefc L., Horák D.: Nanoscale *9*, 16680 (2017).
3. Sedlacek O., Kucka J., Mattova J., Parizek M., Studenovsky M., Mackova H., Lobaz V., Pouckova P., Hruby M.: Eur. J. Pharm. Sci. *63*, 216 (2014).
4. Patsula V., Horák D., Kučka J., Macková M., Lobaz V., Francová F., Herynek V., Heizer T., Páral P., Šefc L.: Sci. Rep. *9*, 10765 (2019).
5. Kostiv U. a 11 spoluautorů: Sci. Rep. *10*, 20016 (2020).
6. Macková H., Plichta Z., Proks V., Kotelnikov I., Kučka J., Hlídková H., Horák D., Kubinová Š., Jirásková K.: Macromol. Biosci. *16*, 1621 (2016).
7. Oleshchuk D., Sálek P., Dvořáková J., Kučka J., Pavlová E., Francová P., Šefc L., Proks V.: Mater. Sci. Eng. C *126*, 111865 (2021).
8. Kolouchová K., Herynek V., Groborz O., Páral P., Kučka J., Šefc L., Hrubý M.: Chem. Mater. *36*, 4417 (2024).
9. Škodová M., Kučka J., Mattová J., Poučková P., Hrubý M.: React. Funct. Polym. *73*, 1426 (2013).
10. Mattová J., Poučková P., Kučka J., Škodová M., Vetrík M., Štěpánek P., Urbánek P., Petřík M., Nový Z., Hrubý M.: Eur. J. Pharm. Sci. *62*, 1 (2014).
11. Vetrík M. a 11 spoluautorů: J. Controlled Release *273*, 131 (2018).
12. Groborz O. a 19 spoluautorů: Macromol. Biosci. *20*, 2000254 (2020).
13. Vetrík M. a 11 spoluautorů: J. Controlled Release

259, E97 (2017).
14. Loukotová L., Pár al P., Kolářová V., Heizer T., Šefc L., Štěpánek P., Hrubý M.: J. Controlled Release *268*, 78 (2017).
15. Jäger A., Sedláček O., Kučka J., Hrubý M.: Biomacromolecules *19*, 2443 (2018).
16. Jäger E., Kučka J., Šefc L., Hrubý M.: Biomacromolecules *21*, 1437 (2020).
17. Jäger E. a 12 spoluautorů: Adv. Healthcare Mater. *10*, 2100304 (2021).
18. Albuquerque L. J. C., Kučka J., Šefc L., Hrubý M: J. Controlled Release *332*, 529 (2021).
19. Vetrík M. a 11 spoluautorů: Free Radical Biol. Med. *187*, 132 (2022).
20. Groborz O. a 24 spoluautorů: Adv. Healthcare Mater. *11*, 2201344 (2022).
21. Sakmár M., Kozempel J., Kučka J., Janská T., Stíbr M., Vlk M., Šefc L.: Nucl. Med. Biol. *130*, 108890 (2024).
22. Sakmár M., Kozempel J., Kučka J., Janská T., Stíbr M., Vlk M., Šefc L.: Nucl. Med. Biol. *140*, 108973 (2025).

J. Kučka[a], J. Humajová[c], M. Vetrík[a], J. Pánek[a], M. Hrubý[a], M. Zadinová[c], P. Francová[b], L. Šefc[b], and P. Poučková[c] *([a] Institute of Macromolecular Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic, [b] Center for Advanced Preclinical Imaging, First Faculty of Medicine, Charles University, Prague, Czech Republic, [c] Institute of Biophysics and Informatics, First Faculty of Medicine, Charles University, Prague, Czech Republic):* **Fifteen Years of Cooperation between the Radiochemical Laboratory of the Institute of Macromolecular Chemistry of the Academy of Sciences of the Czech Republic and the First Faculty of Medicine of the Charles University**

The Radiochemical Laboratory of the Institute of Macromolecular Chemistry, Czech Academy of Sciences (CAS), was established in 2009 to advance the synthesis and characterization of radiolabeled polymers and nanoparticles. From the outset, close collaboration with the biological and medical departments of the First Faculty of Medicine, Charles University, proved essential. This article summarizes a fifteen-year collaboration, from the earliest experiments at the Institute of Biophysics and Informatics to the current era of the Center for Advanced Preclinical Imaging (CAPI). The partnership has led to joint publications, projects, and patents with implications for medicine. The text further provides an overview of technical equipment, practical requirements for *in vivo* experiments, and the economic aspects of preclinical research.

Keywords: radiopharmaceuticals, radioactively labeled compounds, biodistribution, biological testing, imaging methods

Acknowledgements
This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic (grants LUAUS24272, LUAUS24203, and the EATRIS-CZ project, LM2023053), the Ministry of Health of the Czech Republic (AZV, grant NW24-03-00387), and the Strategy AV21 project (research program "Breakthrough Technologies for the Future – Sensing, Digitization, Artificial Intelligence and Quantum Technologies," research topic "New correlative techniques for the analysis and imaging of biological and synthetic polymer materials").

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Chemické Listy

Referát

www.chemicke-listy.cz

JAN AMOS KOMENSKÝ A ALCHYMIE

Miroslav Novák

Ústav učitelství chemie a humanitních věd, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republika
Miroslav.Novak@vscht.cz

Došlo 23.9.25, přijato 17.10.25.

Renesanční myslitel Jan Amos Komenský věnoval své práce pedagogice, filosofii, teologii, politice, sociálním reformám a překvapivě také alchymii. Ve svém díle „Labyrint světa a ráj srdce“ kriticky odsoudil neúspěšné pokusy alchymistů o výrobu zlata a kamene mudrců. O deset let později však ve svém rozsáhlém díle „Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis“ použil alchymistické teorie jako základ pro svou interpretaci přírodních jevů a procesů. Komenský jako hluboce věřící člověk použil mosaickou interpretaci přírody z biblické knihy Genesis (První kniha Mojžíšova), ale kombinoval ji s alchymistickou teorií složení hmoty založenou na principech rtuti, síry a soli a s myšlenkou, že základní přírodní procesy jsou založeny na přeměně hmoty na páru a její následné kondenzaci, k čemuž dochází jak reálně, tak obrazně v alchymistických destilačních přístrojích – alembicích.

Klíčová slova: J. A. Komenský, pedagogika, alchymie, alembik, Labyrint světa a ráj srdce, Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis

Obsah

1. Úvod
2. Komenského pedagogická díla
3. Komenského díla s alchymickou tématikou
4. Závěr

Motto: *Omnia sponte fluant, absit violentia rebus.*

1. Úvod

Životní postoj Jana Amose Komenského (1592–1670) obsažený v mottu „*Vše ať volně plyne, ať věci jsou prosté násilí*“ byl bohužel pouze nesplněným přáním tohoto renesančního myslitele, pedagoga, filosofa, teologa, politika a reformátora. Jeho život byl plný osobních i společenských tragédií: část života prožil během třicetileté války, několikrát přišel při požárech a válečných katastrofách nejen o majetek, ale i o dlouhodobě zpracovávané rukopisy svých prací, pohřbil dvě manželky a dva syny a byl vyhnán ze své vlasti. Přesto zanechal rozsáhlé dílo, jehož valná část je v platnosti dodnes, pokrývající řadu témat mnohdy vzájemně vzdálených: pedagogiku, teologii, filosofii, správu věcí veřejných, pansofii („všeobecnou moudrost“) a přírodovědné úvahy, v mnohém vycházející ze soudobé alchymie. Jazykem jeho prací je v převážné míře latina, ale publikoval i v angličtině, němčině a samozřejmě i česky. Mnoho prací zůstalo v rukopise, mnohé byly ztraceny nebo zapomenuty a další zatraceny v důsledku tehdejšího stavu evropské společnosti. Kompletní a jednotné vydání všech Komenského spisů zatím neexistuje; souborné vydání díla „*Johannis Amos Comenii Opera omnia – Dílo Jana Amose Komenského*“, připravované Akademií věd není dosud dokončeno.

2. Komenského pedagogická díla

Z celé řady Komenského publikací jsou nejvíce známa a v odborných kruzích ceněna jeho nadčasová pedagogická díla, uveřejněná v celé řadě vydání a překladů, především *Velká didaktika* (*Didactica magna*), kterou napsal v letech 1633–1638 v Lešně[1]; Komenský ji označil za „*všeobecný návod na učení všech lidí všem věcem*“ (cit.[2]). Další významný pedagogický spis, mnohokrát přeložený, tentokrát o předškolní výchově, je *Informatorium školy mateřské* (např. cit.[3,4]). Ve své době byla úspěšná moderně a encyklopedicky pojatá učebnice latiny *Brána jazyků otevřená*[5] a obrázková učební encyklopedie *Svět v obrazech*[6] popisující svět, nebesa, rostliny, živočichy, lidské činnosti a mnoho dalšího, vše doprovázené názornými dřevoryty. Rozsáhlým pedagogickým dílem je i dále popisovaný *Přehled fyziky dle světla božího opravený* (dále jen *Fyzika*)[8], patřící mezi méně známé Komenského spisy. *Fyzika* byla původně napsána s cílem sloužit jako encyklopedická učebnice přírodovědy, ale Komenský se ji

později snažil přepracovat na vědecký spis o přírodě sloužící jako základ celého pansofického systému; to se mu podařilo jen zčásti[10].

3. Komenského díla s alchymickou tématikou

Alchymie se dotýkají dvě Komenského díla: jedním z nich je *Labyrint světa a ráj srdce*[7], kde se o alchymii hovoří explicitně, druhým zmíněná *Fyzika*, kde se slovo alchymie sice nevyskytuje vůbec, o to hlouběji je alchymickým uvažováním i alchymickou praxí spis prostoupen. Postupná přeměna alchymie v moderní vědu započala v období renesance, tedy v době, kdy Komenský žil. Proto je nepřekvapivý Komenského přístup k alchymii – na jedné straně kritický pohled na alchymii hledající pochybné cesty k výrobě zlata a kamene mudrců, a na druhé straně chápání alchymie jako základu popisu přírody a života; první pohled Komenský vtělil do popisu alchymie v *Labyrintu světa*, druhý do *Fyziky*.

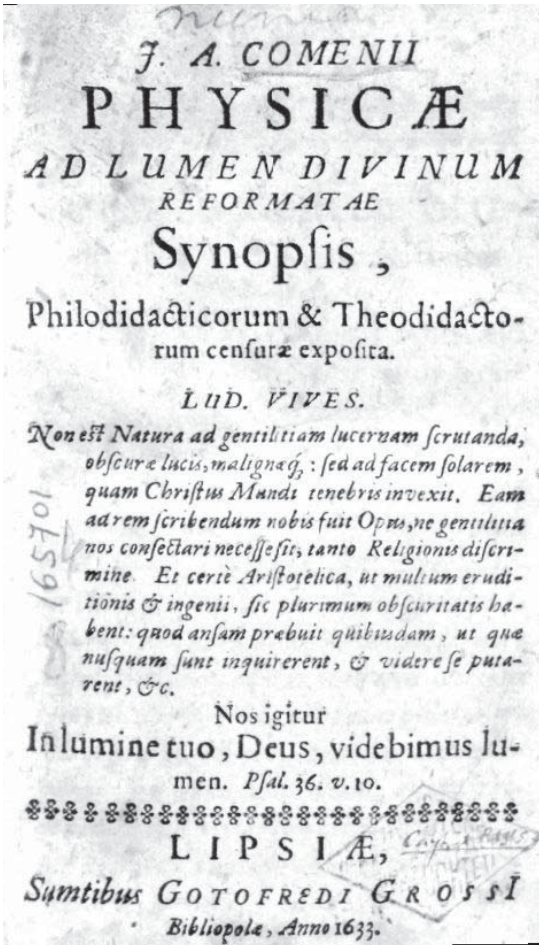
V jeho nejznámějším díle – je to světově nejvydávanější kniha českých autorů vůbec – alegorickém *Labyrintu světa a ráji srdce* (první verze[7] byla Komenským opakovaně upravována) Komenský takřka beletristicky líčí „marnosti a hříčky tohoto světa“, v mnohém odrážející jeho vlastní zážitky a pozorování lidské společnosti, a vtipně kritizuje společenské a morální vady. Dvanáctá kapitola *Labyrintu* popisuje kriticky alchymii; z jejího obsahu bývá někdy odvozováno, že Komenský alchymii jako celek odsuzoval, což ale *Fyzika* vyvrací. Protagonista knihy, Poutník, má v alchymii spatřovat „vrchol lidského důvtipu a tak rozkošnou práci, že kdo se do ní jednou dá, nemůže ji až do konce života opustit …“, a poznat, že alchymisté jsou „nejbystřejší z filosofů, kteří dělají to, co ani samo slunce svým žárem nedokáže v hlubinách země stvořit,…zlato.“ Stejně výsměšně jsou popsány marné snahy připravit kámen mudrců, který „mění kovy ve zlato … a nedopustí, aby (člověk) zemřel dříve než po dvou či třech stech letech“. Odsouzení alchymie, zde ovšem *podvodné alchymie*, *zlatodějství*, mimo jiné pramenilo z Komenského náboženského přesvědčení: jediným tvůrcem je Bůh a člověk se nesmí snažit se mu rovnat.

Druhé Komenského dílo, zabývající se alchymií, představuje mnohasetstránková *Fyzika*, jeho nejrozsáhlejší přírodovědná práce, kterou napsal zhruba deset let po *Labyrintu světa* roku 1632 v Lešně a byla vydána o rok později v Lipsku[8]; za jeho života *Fyzika* vyšla v dalších latinských vydáních a v angličtině[9] (obr. 1). Kniha byla původně napsána s cílem sloužit jako učebnice přírodní filosofie, ale Komenský se ji snažil později přepracovat na vědecký spis o přírodě, který měl byt základem celého pansofického systému[10]. Ve *Fyzice* je patrná, byť nedeklarovaná, snaha negovat kritický přístup k alchymii popsaný v *Labyrintu*, slovo alchymie se tam vůbec nevyskytuje a mluví se nikoliv o alchymistech, ale o chemicích (*chymici*[8] nebo *chymicks*[9]).

Inspirací a předlohou Komenského díla byl spis teologa, filosofa a pedagoga Johanna Heinricha Alsteda *Physica harmonica*[11,12], která vyšla rok před počátkem Komenského studií na univerzitě v Herbornu, kde byl Alsted jeho učitelem. Alsted definoval čtyři druhy „fyziky“: fyziku mosaickou, tj. vyklad přírody, postavený na základě biblického stvoření (První kniha Mojžíšova, Genesis; Mojžíš – Moises, Moses), fyziku židovskou, tj. rabínskou a kabalistickou (přímo související se Starým zákonem), fyziku peripatetickou, tj. tehdejší školskou fyziku založenou na Aristotelově učení (ve škole založené Aristotelem se vyučovalo při chůzi; περιπαθώς, peripathós – chůze), a posléze fyziku chemickou (*Physica chemica*), obraz přírody na základě alchymického chápání světa.

Tehdejší pojem „fyzika“ zavedl Aristoteles – rozlišoval mezi přírodou (φύσις, fysis) a lidským výtvorem (τεχνη, techné) – a zahrnoval nejen fyziku v dnešním pojetí, nýbrž i chemii, astronomii, biologii a všechny další přírodní vědy; v tomto smyslu jej užíval Alsted a poté i Komenský.

Komenského dílo začíná obsáhlým úvodem, v němž odmítl peripatetickou fyziku a prohlásil, že jediným pravým, skutečným a jasným obsahem filosofie je čerpat vše


J. A. COMENII
PHYSICÆ
AD LUMEN DIVINUM
REFORMATAE
Synopsis,
Philodidacticorum & Theodidactorum censuræ exposita.
LUD. VIVES.
Non est Natura ad gentilitiam lucernam scrutanda, obscuræ lucis, malignæq; : sed ad facem solarem, quam Christus Mundi tenebris invexit. Eam ad rem scribendum nobis fuit Opus, ne gentilitia nos consectari necesse sit, tanto Religionis discrimine. Et certè Aristotelica, ut multum eruditionis & ingenii, sic plurimum obscuritatis habent: quod ansam præbuit quibusdam, ut quæ nusquam sunt inquirerent, & videre se putarent, &c.
Nos igitur
In lumine tuo, Deus, videbimus lumen. Psal. 36. v. 10.
LIPSIÆ,
Sumtibus GOTOFREDI GROSSI
Bibliopolæ, Anno 1633.

Obr. 1. **Titulní stránka latinského vydání Komenského *Fyziky***[8]

ze smyslů, rozumu a Bible: „Kdekoli selhává rozum nebo smysl, vděčíme Boží milosti za to, že nám ráčila zjevit mnohé věci, které přesahují rozum a smysl, například první stvoření světa a složení věcí neviditelných. … budeme se řídit Mojžíšem (který stvoření světa popsal na Boží příkaz) a přitom vždy pozorně sledovat svědectví smyslů a rozumu.“ Nepopíral názor o složení hmoty z atomů: „Moudrost Boží nám odhalila, že atomy se spojily do hmoty vlivem vdechnutí ducha života a začaly se rozlišovat do tvarů.“, ovšem opět jen na biblickém základě. Komenský jako hluboce věřící člověk se ve *Fyzice* viditelně přiklonil k mosaickému výkladu přírody, nicméně dalším základem spisu zůstala chemická fyzika v Alstedově pojetí, v dané době představovaná alchymií. Jedním z důvodů, proč Komenský přestal odmítat alchymii, byla jeho koncepce pansofie (všeobecné moudrosti, vševědy), která vycházela z myšlenky, že v různých a viditelně odlišných formách poznání existuje základní všestranné poznání, které, pokud se stane součástí všeobecného vzdělání, může vést k reformě lidské společnosti a právě za tento základ všestranného poznání považoval alchymii jako „prostředek zušlechtění duše, náboženského smíření a proměny lidstva“ a za jedinou vědu, která je schopna proniknout k podstatě věcí.

Obsah *Fyziky* je pestrý, představu si lze utvořit z názvů dvanácti kapitol: Idea světa, který má být vytvořen, O principech světa, hmoty, ducha a světla, O pohybu věcí, O vlastnostech věcí, O proměně věcí, O elementech, O parách, O pevných látkách, O rostlinách, O živých stvořeních, O člověku a také O andělích. Je zřejmé, že v krátkém článku nelze obsah kapitol detailně popsat a následující řádky představují jenom neúplný výtah. Kapitoly mají vesměs explicitní alchymický podtext, nejvíce „chemická“ je asi čtvrtá kapitola O vlastnostech věcí.

Hmota

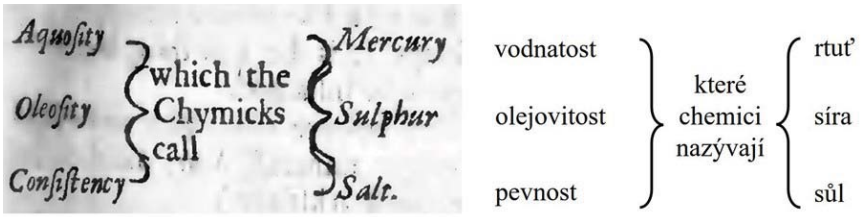
Viditelný svět podle Komenského spočívá na jedné straně na třech „viditelných základech“, kterými jsou neživá hmota (*materia*), duch (*spiritus*) a světlo (*lux* neboli oheň); podle jeho víry hmota pocházela od Boha Otce, světlo od Boha Syna a životní duch od Ducha svatého, což se v podstatě blíží tehdy platným alchymickým představám[13,14]. Na druhé straně svět spočívá na třech „látkotvorných kvalitách“, kterými jsou principy „rtuť“, „síra“ a „sůl“, a v tomto případě je to představa zcela alchymická: jde o teorii *tria prima*, která se stala základním pojmem popisujícím složení hmoty pozdně středověké a raně novověké alchymie; uznával ji i Komenský a jeho *Fyzika* je na ní postavena.

Teorie *tria prima* nebo také *tria principia* (tři prazáklady, principy), případně *trojlátková nauka*, se postupně vyvinula z Aristotelových čtyř živlů: ohně, vzduchu, vody a země; ty měly pouze vlastnosti (teplo, sucho, vlhko, chlad) a postrádaly tvar a hmotnost. Arabští alchymisté, především Geber (Abú Músa Džábir ibn Hajján), tuto teorii upravili: látky a zejména kovy představují kombinace „síry“ a „rtuti“. Nešlo o skutečné prvky, ale principy mající obecné vlastnosti, nahrazující živly Aristotelovy teorie – „rtuť“ nahradila vodu a vzduch – je tekutá a těkavá, „síra“ oheň a vzduch – je hořlavá a měnitelná v plyn. Ve středověku byla – se značnou mírou nejednoznačnosti – středověkým lékařem a alchymistou Paracelsem viditelně chybějící netěkavá a stálá „země“ nahrazena principem „sůl“[15]. Živel oheň zaujímal zvláštní postavení: pocházel ze Slunce a byl nejenom podstatou tepla, ale i počátkem a pramenem života. Tři uvedené principy se někdy označují pro odlišení od reálných látek jako „filosofické“, tj. filosofická rtuť, filosofická síra a filosofická sůl; Komenský ve *Fyzice* princip „rtuť“ označuje jako *Mercurius*, aby ji odlišil od kovové rtuti (*argentum vivum*, živé stříbro[8,9]).

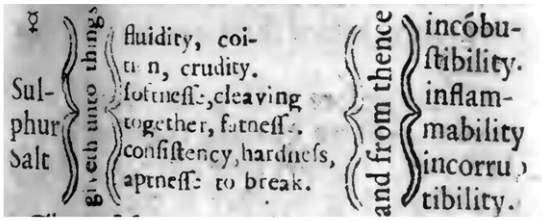
Prolínáním „látkotvorných kvalit“ a „viditelných základů“ se vytvářejí druhy věcí: „*Mercurius* dodává látce tekutost a snadnou spojitelnost, protože rtuť, která obsahuje hlavně *Mercurius*, je nesmírně tekutá, nefixovatelná, neuchopitelná, nehořlavá, odpařitelná při zahřátí ohněm. Síra je příčinou koagulace těl, protože v suchých, pevných látkách je více oleje než ve vlhkých, a proto zbytky popela (poté co síra byla odstraněna zahřátím ohněm) tvoří hmotu, nikoli když se na ně nalije voda, ale když se ošetří tukem nebo olejem. Sůl je příčinou pevnosti, protože chymici dokáží z lidských a zvířecích kostí získat čistou sůl. Všechna hustá tělesa vůbec po sobě zanechávají velké množství popela (= sůl) jako zbytek.“

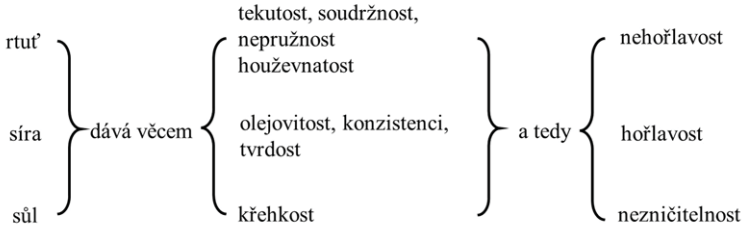
Komenský své představy doplnil názornými grafickými schématy. Na obr. 2 jsou znázorněny kvalitativní vlastnosti principů *tria prima*, na obr. 3 souvislost vlastností reálných látek s obsahem principů *tria prima*.

Lze spekulovat, těžko říci zda úspěšně, zda se Komenského „olejovitá síra“ (Komenský v textu často zaměňoval olejovitost – tučnost – mastnost) později neobjevila jako Becherova „tučná zemina“ (*terra pinguis*) – předob-



Obr. 2. **Kvalitativní vlastnosti principů *tria prima*** (kopie originální předlohy[9], vedle překreslené schéma v češtině)





Obr. 3. **Souvislost vlastností reálných látek s obsahem principů *tria prima*** (kopie originální předlohy[9], pod ní překreslené schéma v češtině)

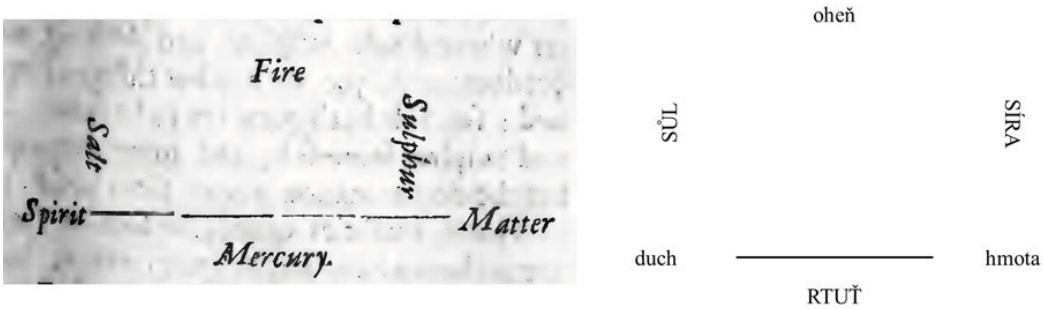
raz flogistonu, který později vtělil do kompletní teorie a pojmenoval Stahl[17].

Na obr. 4 je znázorněno prolínání „viditelných základů“ a „látkotvorných kvalit“, tedy Komenského základ viditelného světa; v novodobých vydáních *Fyziky*[16] a komentářích[21,22] je tento diagram kreslen v podobě trojúhelníku (obr. 5).

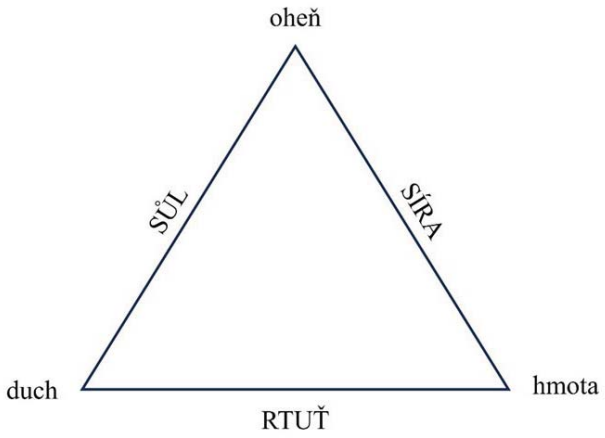
Principy *tria prima*, obsažené ve všech hmotných látkách, například ovlivňují i chuť: „Zdá se, že byliny, ovoce, části živých tvorů a minerály mají svou chuť díky soli a síře, které jsou rozptýleny všude a které každý tvor vdechuje v menší či větší míře podle své povahy. Rtuť sama o sobě nemá chuť, ale ostatní látky jsou jí nasáklé, stejně jako různými stupni chladu nebo tepla, takže jsou více či méně sladké, hořké, slané atd.“ Tento vliv má dokumentovat obr. 6, principy „síra“ a „sůl“ jsou zde ale viditelně pomíchány s reálnými látkami.

Přírodní pochody

Základní přírodní pochody jsou podle Komenského založené na přeměně hmoty v páry a jejich následné kondenzaci, reálně ale i obrazně probíhající v alchymickém destilačním přístroji – alembiku, ve své základní podobě varné nádobě s přitmeleným kloboukem s alonží (obr. 7; někdy se jako alembik označuje jen samotný klobouk). „Svět je alembik přírody, vzduch je klobouk tohoto alembiku. Slunce je oheň: země, voda, minerály, rostliny atd. jsou věci, které jsou tímto ohněm změkčeny a neustále vydechují páry vzhůru. Tak vystupují sůl, síra, nitr a další páry, které se zahalují do mraků a rozličné účinky vydávají, na příklad když sírové výdechy s nitrem se smísí, tak dlouho se navzájem snášejí, až síra vzplane. Jakmile k tomu dojde, dojde ke stejnému účinku jako u střelného prachu (jehož složení je stejné, ze síry a nitru) – boj, vzrušení, hluk a prudké vyvržení hmoty. Neboť odtud je vyvržena hořící hmota (tj. blesk, pozn. autora), která vzápětí zapálí vše, čeho se dotkne a co má sklon k plamenům,



Obr. 4. **Vzájemné prolínání „viditelných základů“ a „látkotvorných kvalit“** (kopie originální předlohy[9], vedle překreslené schéma v češtině)



Obr. 5. **Trojúhelníkové znázornění vzájemného prolínání „viditelných základů“ a „látkotvorných kvalit“** (podle cit.[21,22])

a když se zarazí do země, promění se v kámen“. Slučování plynné síry a „těkajícího nitru“ (nitr = sanytr, ledek, dusičnan draselný) je třeba brát s rezervou, nicméně o složení střelného prachu měl Komenský viditelně povědomí.

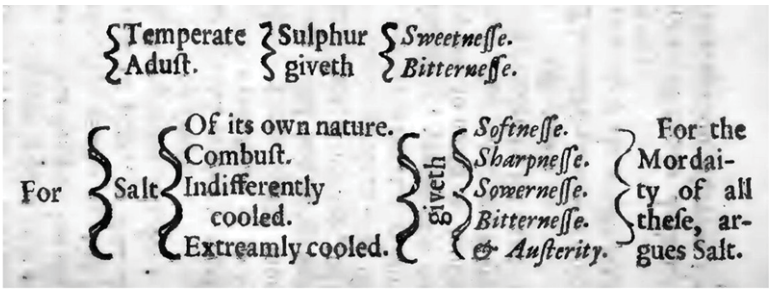
„Konkrétní substance – hvězdy, meteory a minerály“ jsou zkondenzované páry, které mají určitou formu. Minerály se tvoří v zemi, Boží laboratoři (*laboratorium Dei*[8]), z podzemních par: „V nejhlubších průchodech a žilách, které se vinou všemi směry, se vytvářejí nekonečné páry a neustále se destilují tisíci způsoby.“

Nejdůležitější destilační pochody odehrávající se v přírodě jsou spojeny s životem: živá těla zvířat a rostlin „nejsou nic jiného než výrobna par a představují alembiky nepřetržitě vypouštějící páry dokud jsou těla živá nebo teplá.“ Alembiky se uplatňují i při trávení: „Potrava, která se dostává do úst, žvýká zuby nebo čelistmi a prochází hrdlem se v žaludku vaří, jako by byla několik hodin uzavřena v alembiku.“ Některé příklady „destilace“ jsou ovšem úsměvné: „Někdy padají s deštěm červi, malé ryby, žáby atd., které, jak je velmi pravděpodobné, se náhle zrodily v oblaku z páry stejné povahy, díky živému duchu, který se s ní smísil.“

4. Závěr

Je otázkou, proč Komenský, původně alchymií zřejmě pohrdající, změnil názor a bezvýhradně přijal teorii *prima tria* a s ní pak i další alchymické představy. Kromě jistě mnoha jiných důvodů mohlo být i jednou z příčin, že *tria prima* hladce zapadala do Komenského triadického pojímání světa. Komenský totiž přímo vyhledával a používal trojčlenné skupiny, triády[18,19]– analogické *tria prima*; to ovšem v jeho době nebylo výjimečné[14]. V jeho dílech tak nacházíme vedle základní triády tří „viditelných základů“ hmoty, světla a ducha i Nejsvětější Trojici, stvoření světa Bohem podle míry, počtu a váhy (*mensura*, *numerus*, *pondus*), tři Boží knihy: příroda, mysl, Bible[20] a řadu dalších; jedna triáda je věnována i andělům: celý vesmír se skládá z objektů viditelných (tělesa), neviditelných (andělé) a z těch, které mají účast na obojím (člověk).

V každém případě Komenský prokázal hluboké znalosti soudobé alchymie, jak v kritickém pohledu v *Labyrintu světa*, tak o deset let později ve *Fyzice*, kde ji naopak akceptoval jako základ přírodních věd a prostředek „zušlechtění duše, náboženského smíření a proměny lidstva“. Neexistují sice doklady o tom, že by Komenský byl alchymistou v pravém slova smyslu, jak tvrdí například



síra { mírně teplá, spálená } dává { sladkost, hořkost }

sůl { co taková, vypálená, mírně chladná, velmi chladná } dává { slanost, ostrost, kyselost, hořkost a trpkost } za pálivost těchto všech odpovídá sůl

Obr. 6. **Vliv různých stavů síry a soli na chuť** (kopie originální předlohy[9], pod ní překreslené schéma v češtině)

Obr. 7. **Dva alembiky na vodní lázni**[23]

Strunz[21], a že by alchymii praktikoval, ale z jeho textů je patrná hluboká povědomost jak o teoretických základech, tak i o experimentálních postupech tehdejší alchymie. Je jisté, že musel podrobně prostudovat dostupnou alchymickou literaturu, a navíc realistický popis alchymických dílen a alchymických postupů s jejich technickými problémy v *Labyrintu* evokuje představu, že nějakou alchymickou dílnu někdy navštívil. Je ovšem třeba uvést, že v Komenského době se teoretické úvahy o složení hmoty počínaly míjet s alchymickými představami které uznával, a započal postupný vývoj vedoucí ve svých důsledcích až k moderní chemii; tento posun Komenský ve svých názorech, a potažmo ve *Fyzice*, nezachytil.

LITERATURA

1. Comenius J. A.: *Didactica magna*. V knize: *Opera Didactica Omnia*. Amsterdami 1657.
2. https://komensky.mjakub.cz/didactica-magna--idc248, staženo 10. 7. 2025.
3. Comenius J. A.: *Informatorium Der Mutter Schul*. Lissaw (Lešno) 1633.
4. Comenius J. A.: *Informatorium*. V knize: *Opera didactica omnia*. Amsterdami 1657.
5. Comenius J. A.: *Janua linguarum reserata*. Lesnensis (Lešno) 1631.
6. Comenius J. A.: *Orbis sensualium pictus*. Noribergae (Norimberk) 1658.
7. Komenský J. A.: *Labirynt swěta a Lusthaus srdce*. Lešno 1623.
8. Comenius J. A.: *Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis*. Lipsiae (Lipsko) 1633.
9. Comenius J. A.: *Naturall Philosophie Reformed By Divine Light: Or, A Synopsis of Physicks*. London 1651.
10. Comenius J. A.: *Physicae Ad Lumen Divinum reformandae Synopsis. Ad Physicam Addenda*. Amsterdami 1663.
11. Alsted J. H.: *Physica harmonica*. Herborn 1616.
12. Čížek J.: Teorie vědy/Theory of science 12, 117 (2020).
13. Červenka J.: Pedagogika 59, 415 (1971).
14. Červenka J.: *Die Naturphilosophie des Johann Amos Comenius*. Academia, Praha 1970.
15. Bombastus von Hohenheim P. A. T. (Paracelsus): *Das Buch Paramirum*. Mülhausen 1562.
16. Comenius J. A.: *Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis*. Uebersetz und erlautert von J. Reber. E. Roth, Giessen 1896.
17. Stahl G. E.: *Zymotechnia fundamentalis sive fermentationis theoria generalis*. Brandenburg 1697.
18. Pavlas P.: Acta FF ZČU *2012* (4), 16.
19. Pavlas P., v knize: *Nicholas of Cusa and Early Modern Reform* (Burton S., Hollmann J., Parker E., ed.), kap. 15, str. 384. Brill, Leiden 2019.
20. Brambora J.: Pedagogika 5, 589 (1957).
21. Strunz F.*: Astrologie, Alchemie, Mystik*. Planegg, München 1928.
22. Ehrenfeld R.: *Grundriß einer Entwicklungsgeschichte der chemischen Atomistik*. Carl Winter's Universitätsbuchhandlung, Heidelberg 1906.
23. Gessner C.: *The practise of old and new phisicke.* London 1599.

M. Novák (*University of Chemistry and Technology Prague, Czech Republic):* **Jan Amos Comenius and Alchemy**

The Renaissance scholar Jan Amos Comenius devoted his works to pedagogy, philosophy, theology, politics, social reforms, and, surprisingly, alchemy. In his "Labyrinth of the World and the Paradise of the Heart", he denounced unsuccessful attempts of alchemists to make gold and the philosopher's stone. Ten years later, by contrast, in his extensive work "Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis", he used alchemical theories as a basis for his interpretation of natural phenomena and processes. In this book, Comenius, as a deep believer, used a mosaic interpretation of the Nature given in the Genesis (The First Book of Moses), but combined it with the alchemical theory of the composition of matter (mercury, sulphur and salt), and with the idea that elementary natural processes are based on the conversion of mass into vapor and its subsequent condensation. This took place, both realistically and figuratively, in the alchemical distillation apparatuses – alembics.

Keywords: J. A. Comenius, pedagogy, alchemy, alembic, Physicae ad lumen divinum reformatae synopsis

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Chemické Listy

Původní a metodické práce

www.chemicke-listy.cz

RECYKLACE A STABILIZACE STAVEBNÍHO A DEMOLIČNÍHO ODPADU Z JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ

Jan Hadrava a Lumír Nachmilner

Centrum výzkumu Řež, Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká republika
jan.hadrava@cvrez.cz

Došlo 10.10.25, přijato 3.11.25.

Blížící se ukončení provozu jaderných zařízení vyžaduje mimo jiné plánování způsobu nakládání se vzniklými stavebními odpady. Některé z nich mohou být kontaminovány radionuklidy a jejich využití je podmíněno průkazem, že neohrožují bezpečnost životního prostředí, jiné lze bez omezení recyklovat. Rozhodnutí o konečném zneškodnění jednotlivých kategorií stavebního a demoličního odpadu (SDO) je založeno na postupech stanovených legislativními dokumenty vydávanými Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Článek indikuje typy SDO, které mohou vznikat při demontáži jaderných reaktorů, a radionuklidy, které je mohou kontaminovat. Zahraniční zkušenosti ukazují, že většinu odpadů lze využít bez omezení, u zbytku je třeba zjistit, zda mohou být využity v omezeném rozsahu pro vybrané typy staveb, nebo zda musí být umístěny do úložišť radioaktivních odpadů. Příklady jejich využití zahrnují vyplnění volných prostor v úložištích, popř. použití do základů nových staveb. Jiné druhy odpadu lze poté efektivně stabilizovat v pokročilých matricích, které jsou předmětem této práce. V pozdějších letech však bude tato možnost postupně nahrazena recyklačními technikami.

Klíčová slova: recyklace, stavební a demoliční odpad, radioaktivní odpady, stabilizace

Úvod

Jaderná zařízení, zejména energetické reaktory, jsou zpravidla robustní betonové stavby. Při jejich vyřazování z provozu vznikají řádově desetitisíce až statisíce tun stavebních a demoličních odpadů (SDO), které je nutné odpovídajícím způsobem zpracovat. Optimálním způsobem, preferovaným i Evropskou komisí, je jeho opětovné využití. Nehledě k tomu, že tyto odpady bude zakázáno ukládat od roku 2030 na skládku, protože je možné je za stávajícího stavu vědeckého a technického pokroku účelně recyklovat[1], jsou ekonomické výhody recyklace evidentní: kromě administrativního tlaku, jímž je zavádění poplatků za skládkování, popř. zdražování této služby, je upravený stavební materiál vítanou náhradou přírodních plniv betonů, jejichž zdroje jsou omezené. Stávající těžební lokality lze jen obtížně rozšiřovat z technických nebo územně plánovacích důvodů a nezanedbatelným prvkem je i odpor místních komunit, které se často extenzifikaci těžby brání.

Z pohledu veřejnosti je využití stavebního odpadu z likvidovaných jaderných provozů zatíženo nedůvěrou: nemůže být recyklovaný materiál radioaktivní? Tento problém se již ostatně řešil v souvislosti s využitím kameniva z odvalů příbramských uranových dolů při stavbě dálnice D4, kde navíc svou roli hrála ekologická rizika, jako je prašnost při těžbě a dopravě suroviny a poškození flóry, jež se od ukončení provozu šachet na haldách vytvořila.

Typy odpadů

V dalším textu se budeme zabývat SDO vznikajícím při vyřazování jaderných reaktorů: ostatní jaderná zařízení sice mohou také produkovat tyto odpady, ale v podstatně omezenějším rozsahu. Přitom principy nakládání s odpadem zůstávají stejné.

Stavební suť z jaderných reaktorů může obsahovat dvě skupiny radionuklidů. Do první patří ty, které vznikají v důsledku interakce neutronů s prvky obsaženými v tzv. biologické ochraně: její funkcí je zabránit průniku záření od zdroje do okolí. Hlavní roli přitom má železobeton, jehož stínící vlastnosti jsou zvyšovány přídavkem drceného barytu, popř. různých železných rud nebo litinové drti, sekanými kousky nebo kuličkami železa[2].

Spektrum radionuklidů, které přitom vznikají, se pak liší podle složení betonu a jeho výplně[3], může zahrnovat ^{3}H, ^{14}C, ^{41}Ca, ^{45}Ca, ^{54}Mn, ^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{64}Ni, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{133}Ba, ^{134}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{166}Ho a ^{182}Ta, ale většina z nich má krátký poločas rozpadu. Bylo zjištěno, že indukované radionuklidy se mohou nacházet až do hloubky 50 cm betonové konstrukce. Avšak tam, kde byly do stínící vrstvy zabudovány materiály omezující průnik neutronů (neutronový štít), je vrstva obsahující indukované radionuklidy minimální.

Druhou skupinu radionuklidů tvoří ty, které unikly při provozu a při údržbě ze zdroje a povrchově kontami-

novaly přilehlé konstrukce: u reaktorů jsou typickými kontaminanty ^{90}Sr a ^{137}Cs, mohou tam ale být i jiné štěpné produkty, při nehodách se mohou mezi kontaminanty vyskytovat i transurany. Pro omezení kontaminace jsou betony v okolí zdroje pokryty nátěry zabraňujícími průniku kontaminantů do betonů a usnadňujícími dekontaminaci zasažených ploch. Někdy se také používají ocelové obklady, které rovněž snižují riziko kontaminace. Praxe ale ukazuje, že kontaminace se neomezuje jen na povrch konstrukcí, díky porozitě betonu může proniknout do hloubky až 10–15 cm.

S ohledem na uvedené charakteristiky můžeme definovat následující skupiny odpadů:

a) Povrchová vrstva betonů opatřená nátěry, která je nepoužitelná k recyklaci bez ohledu na to, zda obsahuje nadlimitní množství radionuklidů či ne. Přítomnost nátěrových hmot totiž brání homogennímu zabudování drti do cementové záměsi a nepřijatelně zhoršuje její mechanické vlastnosti. Tyto odpady musí být zavezeny do úložiště radioaktivních odpadů (RAO) nebo na skládku, podle toho, do jaké míry jsou kontaminovány radionuklidy.
b) Vrstva obsahující indukovanou radioaktivitu, popř. kontaminovaný beton. Tu lze využít pro recyklaci, pokud se prokáže, že obsah radionuklidů nepřekračuje zákonné limity. Pro rozhodnutí o možnosti jejich využití nebo nutnosti uložení jako RAO je nutné důsledně proměřit všechen zpracovávaný materiál. Vlastní demolici konstrukcí a úpravě získaného materiálu zpravidla předchází testovací a monitorovací program (vrtná jádra, měření aktivity), který cílí na určení míry aktivity a hloubky kontaminace betonů. Získané poznatky umožňují použít efektivní demoliční postupy a omezit tvorbu RAO.
c) Beton, který prokazatelně nemůže obsahovat radiokontaminanty, je uvolněn k neomezenému využití a může být plně recyklován.

O tom, kolik odpadu vznikne v jednotlivých uvedených skupinách a kterými radionuklidy bude nadlimitně kontaminován, rozhoduje řada faktorů:

a) velikost a typ reaktoru – množství odpadů neroste lineárně s jeho výkonem, podstatnější vliv má volba typu reaktoru kvůli rozsahu pomocných provozů,
b) konstrukce reaktoru – je známo, že při stavbě VVER reaktorů (ty stojí v Dukovanech a Temelíně) je spotřebováno více betonu ve srovnání s jinými obdobnými typy,
c) materiály konstrukce – obsahují různá množství prvků, jejichž aktivací vznikají radionuklidy,
d) délka provozu – ovlivňuje jak povrchovou kontaminaci, tak množství aktivovaných radionuklidů,
e) historie provozu – nestandardní situace zvyšují stupeň povrchového znečištění staveb, extrémem jsou havárie (Černobyl, Fukušima, Jaslovské Bohunice A1),
f) četnost a způsob provádění údržby (odstávky, výměna paliva, výměna opotřebovaných nebo poškozených součástí reaktoru).

Pro odhad množství SDO z domácích jaderných elektráren lze využít praktické údaje a odhady ze zahraničních programů. V Greifswaldu (Německo) bylo vyřazeno z provozu 5 reaktorů VVER-440 (cit.[6]). Celkové množství odpadů (vztaženo na 1 reaktor) bylo 360 000 t, z čehož 247 000 t bylo přímo uvolněno k recyklaci: tyto odpady pocházely především ze stavebních konstrukcí. 100 000 t těchto materiálů bylo kontaminováno, ale pouze 3 300 t bylo nutné umístit v úložišti RAO.

Slovenská studie[4] předpokládá, že při likvidaci dvou reaktorů VVER-440 v Jaslovských Bohunicích vznikne 560 000–660 000 t neaktivních SDO, zatímco 2900–3350 t bude nutno umístit do úložiště RAO.

Ve Španělsku je tvorba neaktivních SDO z reaktorů podobného typu, jako je v Temelíně, odhadována na cca 500 000 t, RAO bude cca 11 500 t (cit.[7]).

Pokusíme-li se shrnout předchozí údaje, lze očekávat, že objem betonů a stavebních materiálů, které vzniknou při vyřazování reaktorů typu VVER, se bude pohybovat v následujících mezích:

– nízké tisíce m^3 odpadů určených do povrchového úložiště (nízkoradioaktivní odpady – NAO a velmi nízkoradioaktivní odpady – VNAO),
– cca 10 tisíc m^3 podmíněně uvolnitelných odpadů (lze je uložit v konvenčních skládkách nebo recyklovat s omezeným využitím),
– několik set tisíc m^3 neaktivních materiálů, které lze neomezeně recyklovat.

Radioaktivní nebo uvolnitelné stavební a demoliční odpady?

Cílem nakládání s vybouraným betonem a stavebními materiály je dosáhnout vysoké míry recyklace takto získaných materiálů a maximálně omezit nutnost jejich ukládání jak na konvenční skládky, tak do úložišť radioaktivních odpadů (ÚRAO). Pro rozhodnutí, zda SDO lze znovu využít přímo, s určitým omezením, nebo zda musí být umístěn do ÚRAO, máme účinné legislativní nástroje. Zejména se jedná o následující dokumenty.

– Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon[8], který stanovuje rámec všech činností týkajících se nakládání s radioaktivními materiály, zejména radiační ochrany. Jeho požadavky jsou konkretizovány prováděcími vyhláškami.
– Vyhláška SÚJB č. 377/2016 Sb., o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie[9] konkretizuje některé požadavky Atomového zákona: zabývá se nakládáním s radioaktivním odpadem před i při jeho ukládání a stanovuje požadavky na vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště.
– Klíčem pro rozhodnutí o volném využití získaných stavebních materiálů je míra jejich specifické aktivity: ta nesmí překročit tzv. uvolňovací úrovně. Hodnoty těchto limitů platné v ČR jsou pro všechny radio-

nuklidy tabelovány v příloze 7 Vyhlášky 422/2016 o radiační ochraně[10]; ty vycházejí z doporučení MAAE, ICRP, NEA a EC (cit.[11–15]). Tabulka I uvádí tyto údaje pro nejběžnější radionuklidy, které se ve stavebním rumu pocházejícím z vyřazování JE vyskytují.

Základním požadavkem je oddělit materiály kontaminované radionuklidy od těch, které nepředstavují žádnou hrozbu z radiačního hlediska. Pro tento účel byla vypracována řada postupů k identifikaci stupně kontaminace již před zahájením demoličních činností i při kontrole aktivity vybouraných materiál; znalost stupně kontaminace je důležitá pro výběr metod a postupů demolice betonů a způsobu jejich úpravy pro konečné určení (recyklace, uložení).

Demolice betonu a staveb ve vyřazovaných jaderných zařízeních má čtyři základní etapy:

a) odstranění technologického zařízení, vč. potrubí a rozvodů sítí (elektro, voda, kanalizace),
b) mapování míry kontaminace a aktivace likvidovaných staveb,
c) dekontaminace zamořených povrchů,
d) rozrušení konstrukcí a separace vzniklého odpadu podle jeho konečného určení (uvolnění, zproštění, uložení jako RAO).

Důležitým krokem před zahájením demontáže stavebních prvků je zmapování jejich zamoření, ať už aktivovanými nuklidy nebo vnější kontaminací. Např. při přípravě plánu demontáže reaktorů z V-1 v Jaslovských Bohunicích[16] bylo provedeno 8 vrtů do hloubky 20–40 cm. Hlavní nalezené aktivační nuklidy byly ^{55}Fe, ^{3}H, ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{134}Cs, ^{133}Ba, ^{59}Ni, ^{64}Ni, ^{14}C a beton byl také kontaminován ^{137}Cs. Na základě toho byl stínící beton rozdělen do 9 vrstev podle jejich způsobu odstranění, zpracování a konečného určení.

Při charakterizaci staveb je užitečné posoudit řadu aspektů[17], např.:

– radiologické a kontaminační podmínky pracovního prostoru,
– úrovně povrchové kontaminace a hloubka průniku radionuklidů do konstrukce,
– přítomnost neradioaktivních nebezpečných odpadů,
– chemické a fyzikální vlastnosti vznikajících odpadů,
– konfiguraci a přístupnost stavebních prvků.

Dekontaminace povrchů v likvidovaných provozech je klíčová z několika hledisek: snižuje aktivitu materiálů staveb, a tím i dávkové příkony osob provádějících likvidaci, odstraňuje snadno uvolnitelné radionuklidy, zvyšuje množství odpadů, které bude možno uvolnit či zprostit do ŽP, snižuje množství sekundárních odpadů vznikajících při demoličních činnostech apod. Je třeba poznamenat, že dekontaminace je určena pro ošetření povrchů, ale radiokontaminanty pronikají do konstrukčních materiálů díky jejich porozitě; to také snižuje účinnost odstraňování ze stavebních konstrukcí. Existuje řada dekontaminačních technik, jejichž volba závisí na ošetřovaném materiálu a míře jeho znečištění. Lze je rozdělit do dvou skupin:

a) chemická dekontaminace pomocí kyselin, pěn, gelů, oxidačních a redukčních činidel a chemické extrakce,
b) fyzikální dekontaminace včetně použití snímatelných povlaků, tryskání, broušení, otloukání a odlupování betonu, otryskávání ledem, suché vysávání, elektrohydraulické opracování, robotické otloukání stěn, otryskávání pískem nebo vysokotlakou vodou, čištění měkkými materiály (otryskávání houbou), parní vysávání a pístové nárazové leštění.

Některé z uvedených dekontaminačních technik nacházejí uplatnění i při rozrušování betonů a konstrukcí. Navíc se předpokládá, že plastové povrchy (epoxidové, polyuretanové nebo polyesterové lité podlahy a nátěry stěn, jejichž tloušťka je několik mm), jež jsou zpravidla významně kontaminovány, budou v této fázi odstraněny. Tyto materiály nemohou být recyklovány kvůli jejich chemické podstatě, proto většinou končí v úložištích RAO, v lepším případě na konvenčních skládkách. Podrobnější popis dekontaminačních metod lze nalézt v dokumentu MAAE (cit.[18]).

Možnosti recyklace stavebních a demoličních odpadů

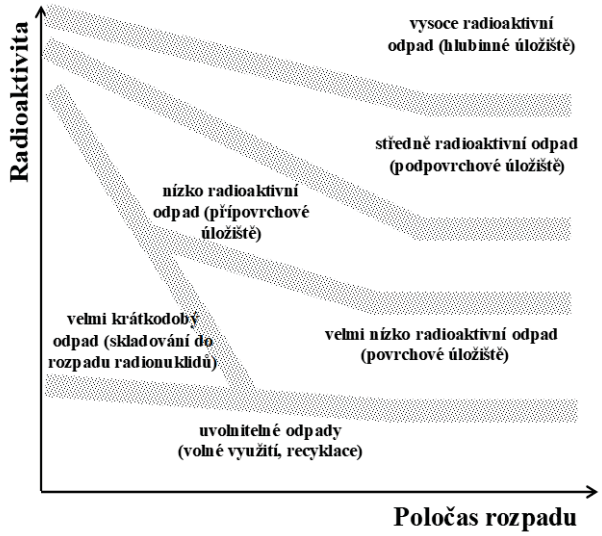
Při vyřazování jaderné elektrárny z provozu vznikne velké množství neradioaktivního betonového odpadu. Ten lze zpracovat konvenčními postupy a zařízeními bez ohledu na to, že pochází z jaderných provozů. Zkušenosti ukazují, že takto lze využít cca 90 % všeho stavebního odpadu. Beton se zpracuje jako běžná stavební suť a odpovídajícím způsobem se recykluje.

Radioaktivní beton musí být v prvním kroku kategorizován na základě jeho specifické aktivity. Pomůckou pro rozhodování o tom, kde má skončit, je diagram na obr. 1 (cit.[13]).

Tabulka I
Uvolňovací a zprošťovací úrovně[a] pro vybrané radionuklidy v ČR (cit.[16])

Nuklid	^{3}H	^{14}C	^{55}Fe	^{59}Ni	^{60}Co	^{131}Ba	^{134}Cs	^{137}Cs	^{152}Eu	^{154}Eu
kBq kg^{-1}	100	1	1000	100	0,1	10	0,1	0,1	0,1	1,1

[a] **Uvolnění z kontroly** – vyloučení materiálů nebo předmětů v autorizovaných zařízeních a činnostech z další kontroly dozorných orgánů (tj. RAO, které mají nižší aktivitu, než jsou uvolňovací úrovně a nejsou již považovány za radioaktivní a nakládání s nimi nepodléhá kontrole dozorných orgánů). **Zproštění kontroly** – rozhodnutí, že na určité zdroje, zařízení a činnosti nemusí být uplatňována kontrola dozorných orgánů (tzn., že se nepředpokládá vznik RAO).



Obr 1. **Schématické znázornění kategorií RAO a jejich předpokládaného umístění**[18]

V podstatě jsou čtyři varianty nakládání s ním podle míry kontaminace:

a) odpadní materiál po přeměření splňuje kritéria pro jeho uvolnění a bude dále zpracováván konvenčními postupy,
b) betony a stavební suť vykazují mírně nadlimitní zamoření krátkodobými nuklidy a bude jej možno po krátkodobém skladování uvolnit k neomezenému použití: jedná se o velmi krátkodobý odpad,
c) betony a stavební suť vykazují mírně nadlimitní zamoření s obsahem dlouhodobých nuklidů a bude jej nutno umístit do úložiště velmi nízko radioaktivních odpadů. Alternativně je možno tyto odpady využít pro stavby nebo konstrukce, jež jsou stále pod kontrolou jaderného dozoru: nejčastěji budou zabudovány do základových vrstev,
d) betony a stavební suť vykazují nadlimitní zamoření a bude je nutno umístit do úložiště nízko nebo – výjimečně – středně radioaktivních odpadů. V některých případech však NAO bude možné využít u specifických konstrukcí jaderných zařízení: uvažuje se o jejich použití při výrobě betonových kontejnerů na radioaktivní odpady, popř. při výplni volných prostor úložišť, kde se zatím používá neradioaktivní beton.

Některé již uskutečněné nebo zvažované způsoby využití radioaktivních SDO jsou uvedeny v tabulce II.

Experimentální část

V této části práce se zaměříme na možnosti zpracování stavebního odpadu, který je nadlimitně kontaminován a není vhodný k recyklaci. Jednou z možností je jeho stabilizace v pevných matricích prostřednictvím solidifikace, kterou Centrum výzkumu Řež v rámci skupiny ČEZ dlouhodobě podporuje.

Při cementaci je běžným procesem solidifikace použití Portlandských typů cementu. Cement však podléhá chemické degradaci v důsledku působení vody nebo kyselého prostředí, což může způsobit vyplavování vápníku z pevné matrice. Tento jev představuje ohrožení bezpečnosti a udržitelnosti skladování odpadu[20]. To vede ke snahám o zlepšení metody solidifikace pomocí cementu a také k nalezení alternativní metody solidifikace. Jednou z možných cest je použití geopolymerů namísto cementu. Geopolymery jsou anorganické polymery, které jsou považovány za ekologické, protože produkují méně skleníkových

Tabulka II
Možnosti využití radioaktivních stavebních a konstrukčních odpadů (upraveno dle cit.[19])

Typ radioaktivního odpadu [a]	Použití	Realizace	Poznámka
VNAO	základy staveb	Sellafield, UK Korea	
VNAO	výplň volných prostor ÚRAO	Drigg, UK	
VNAO	výplň volných prostor v úložném kontejneru	Rumunsko	návrh
VNAO	nedemolovaná základová deska jako podklad pro novou stavbu	Ranstad, Švédsko	
VNAO	konstrukční prvky úložiště	Korea	návrh
Dekontaminovaná hala	nedemontovaná hala využita pro instalaci nové technologie	Caorso, Itálie	
VNAO/NAO	výplň hlubinného úložiště	ČR	návrh
VNAO/NAO	výplň volných prostor v jímkách povrchového ÚRAO	ČR	návrh

[a] VNAO – velmi nízkoradioaktivní odpady, NAO – nízkoradioaktivní odpady

plynů než cement[21]. Geopolymery se připravují polykondenzační reakcí hlinito-křemičitanového prekurzoru s roztokem alkalického aktivátoru za normální teploty a tlaku. Pro výrobu geopolymerů je k dispozici široká škála hlinito-křemičitanových prekurzorů, jako je metakaolin, vysokopecní struska, popílek atd.[22,23]. Kromě vytvrzování při normální teplotě mají geopolymery další výhody, jako je mimo jiné vysoká odolnost vůči kyselinám a teplu, vyšší odolnost proti vyluhování, vysoká strukturální integrita a mechanická stabilita. Mechanismus tuhnutí geopolymerů je založen na rychlé polymeraci spíše než na hydrataci jako u cementu, a proto je tuhnutí mnohem rychlejší[24]. Tyto charakteristiky naznačují, že geopolymery by mohly být dlouhodobě stabilní, a proto potenciálně použitelným materiálem pro solidifikaci radioaktivního odpadu.

Použité materiály

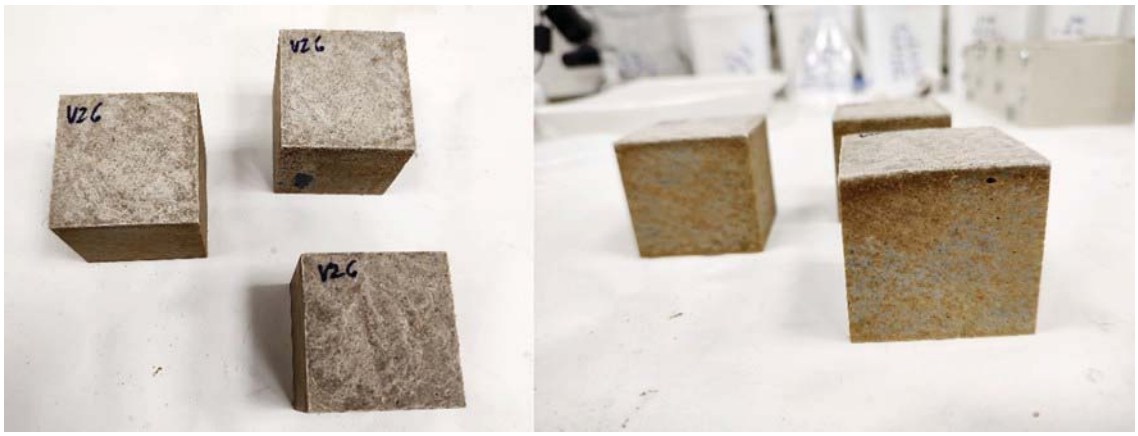
Jako referenční vzorek byla použita betonová suť s vysokým podílem vápenného tmelu bez kovového agregátu pocházející z rekonstrukce odpadních nádrží výzkumného reaktoru v Husinci-Řeži. Vybraný materiál reprezentoval třídu VAO. Jednalo se však o čistý typ vzorku bez kontaminace. V první řadě je nutné sledovat chování matrice bez radiologického vlivu. V současné době však již probíhají práce na vzorcích, kde je tento prvek sledován. Připravená suť byla drcena na velikost zrna 0,2–0,4 cm, což zajišťuje lepší homogenitu matrice. Větší velikost zrna vede k artefaktům v pevnostním profilu a zúžení kritérií WAC. Geopolymery Baucis LK, Baucis LBNa a Baucis LNa použité pro experimenty jsou komerčně dostupné od Českých Lupkových závodů a.s. (https://www.cluz.cz). Baucis LK a LNa se skládají z metakaolinu Mefisto L05 a Baucis LBNa z metakaolinu Mefisto LB05. Chemické složení metakaolinů Mefisto deklarované výrobcem je uvedeno v tabulce III.

Příprava vzorku

Postup přípravy vzorku byl proveden dle návodu výrobce geopolymerů. Specifikované množství sutiny bylo poté vysušeno a smícháno s metakaolinem v homogenní směsi před přidáním alkalického aktivátoru. Doba míchání metakaolinu nebo směsi metakaolinu a sutiny s alkalickým aktivátorem byla 15 minut. Po uplynutí této doby byla geopolymerní směs odlita do krychlových forem o rozměrech 50×50×50 mm (obr. 2) a klepáním byly odstraněny vzduchové bubliny. Vzorky byly zabaleny do hliníkové fólie a umístěny do plastového sáčku, kde se 7 dnů vytvrzovaly. Po uplynutí stanovené doby byly vzorky vyjmuty z formy a byla provedena analýza pevnosti v tlaku. Pro každou analýzu bylo provedeno více měření vzorků (alespoň dvě) a hodnoty relativní směrodatné odchylky byly menší než 10 %. Pro stanovení hmotnosti směsi byly použity váhy RADWAG, WLC 6/A2. Přesnost vah je ±1,0 g. Očekávaná přiřazená nejistota odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 % a faktoru pokrytí k = 2. Analýza pevnosti vzorků v tlaku byla provedena na přístroji MTS 300 Exceed® dle české národní normy ČSN

Tabulka III
Chemické složení metakaolinu Mefisto L05 a LB05

Složka	Mefisto L05 [hm.%]	Mefisto LB05 [hm.%]
Al_2O_3	40,10	37,50
SiO_2	54,10	54,40
K_2O	0,80	1,10
Fe_2O_3	1,10	3,50
TiO_2	1,80	1,30
MgO	0,18	0,25
CaO	0,13	0,28



Obr 2. **Vzorky metakaolinu s obsahem betonové sutě**

EN 12390-3 Zkoušení vytvrzeného betonu – Část 3: Pevnost vzorků v tlaku. Rentgenová difrakční analýza (XRD) byla získána na difraktometru PANalytical X´Pert PRO vybaveného rentgenovou trubicí (záření Co-Kα, 40 kV, 30 mA), detektorem PIXcel 3D-Medipix3 (1D režim) a optikou iCore a dCore v primárním a difrakčním paprsku.

Výsledky a diskuse

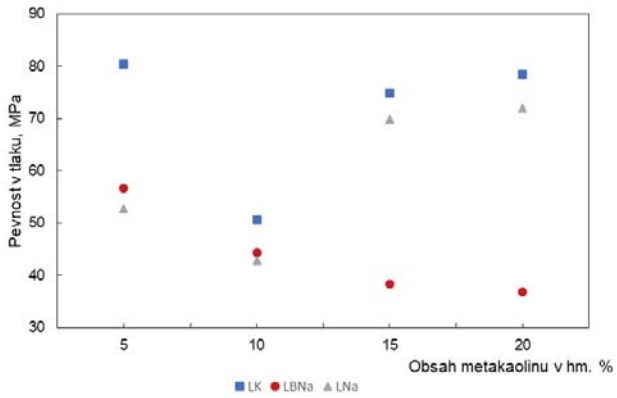
Byly provedeny různé sady experimentů. První experiment spočíval v přípravě vzorků všech tří receptur geopolymerů a přidání specifického množství metakaolinu za účelem určení, který geopolymer má nejlepší pevnost v tlaku. U těchto vzorků bylo do směsi přidáno 5, 10, 15 a 20 hm. % relevantního metakaolinu jako pojiva pro lepší vlastnosti. Tato úprava vyplynula z předchozích experimentů a konzultací. Nejlepších výsledků v pevnosti dosáhl Baucis LK mezi hodnotami 50 až 80 MPa v závislosti na množství přidaného metakaolinu, a proto byl vybrán pro následné experimenty jako nejvhodnější. Vzorek Baucis LNa s 10 hm. % metakaolinu vykazoval pokles pevnosti v tlaku ve srovnání s 5 hm. %, ale vzorky s dalším přídavkem metakaolinu už měly rostoucí trend v pevnosti. Hodnoty pevnosti v tlaku u vzorků Baucis LBNa se s přidáním metakaolinu snížily z 56 na 36 MPa. Srovnání směsí Baucis LK, LBNa a LNa je znázorněno na obr. 3. Rozdílné hodnoty pevnosti v tlaku mezi testovanými geopolymerními směsmi jsou způsobeny především jejich chemickým složením.

Vliv doby vytvrzování

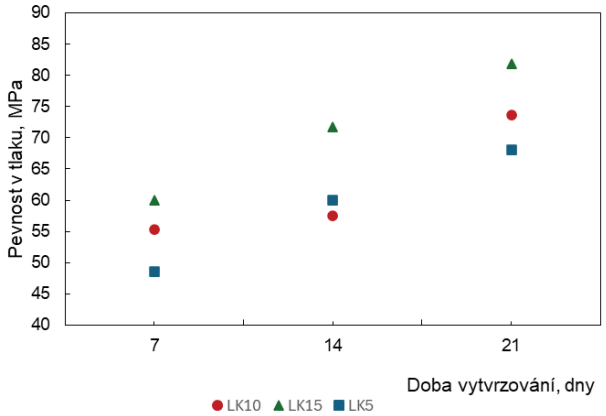
Při zkoumání vlivu doby vytvrzování na pevnost v tlaku byly připraveny tři sady vzorků Baucis LK s přídavkem 5, 10 a 15 hm. % metakaolinu (LK5, LK 10 a LK15), které byly vytvrzovány po různou dobu. Doby vytvrzování byly zvoleny 7, 14 a 21 dní. Jak je vidět na obr. 4, doba vytvrzování pozitivně ovlivnila hodnoty pevnosti v tlaku u všech tří geopolymerních směsí, což je způsobeno kontinuálním polymeračním procesem. Delší doba vytvrzování vedla k vyšší pevnosti v tlaku, podobně jako v jiných studiích[25,26]. Směs LK5 vykazovala menší pevnost v tlaku ve srovnání s LK10 a LK15. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku byly naměřeny u LK15 a činily 60, 72 a 82 MPa po 7, 14 a 21 dnech vytvrzování. Lze pozorovat, že přidání metakaolinu zvýšilo hodnoty pevnosti v tlaku. Nicméně vyšší obsah metakaolinu také zvyšuje viskozitu směsi. Přidáním více než 15 hm. % metakaolinu značně komplikuje míchání a zvýšilo pórovitost vzorků, což mělo negativní vliv na výsledné vlastnosti geopolymeru.

Vliv množství betonové suti

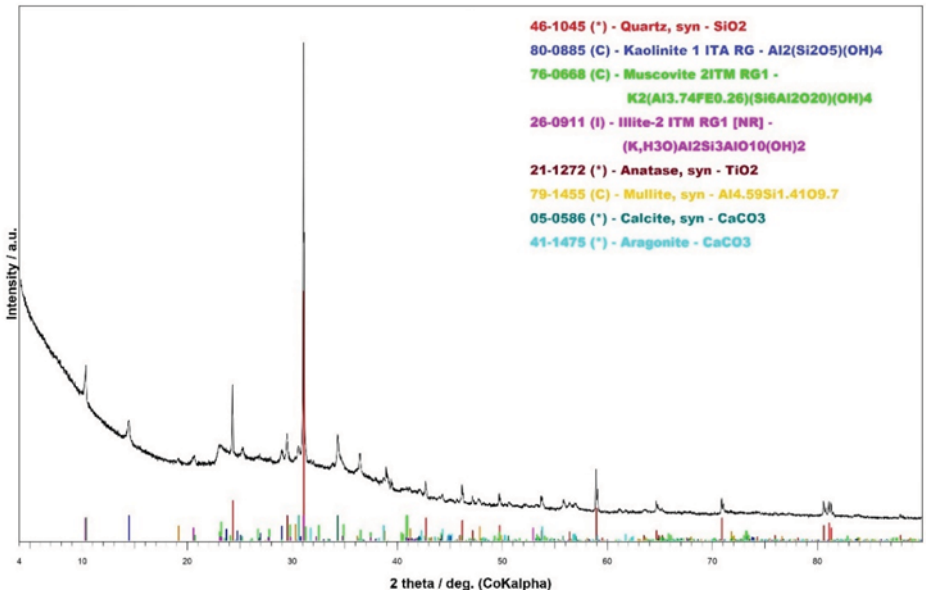
Protože směsi LK10 a LK15 vykazovaly v předchozích testech vyšší hodnoty pevnosti v tlaku, byly následně použity pro experimenty, kde bylo do směsi přidáno stanovené množství betonu místo metakaolinu. Obě geopolymerní směsi měly podobnou hodnotu pevnosti v tlaku při 10, 15 a 20 hm. % betonu. Výrazně vyšší pevnost v tlaku 58 a 59 MPa byla pozorována u vzorků LK10 s 25 a 30 hm. % betonu ve srovnání se vzorky LK15, kde hodnoty činily 23 a 16 MPa. Lze konstatovat, že přidáním většího množství metakaolinu spolu s vyšším množstvím betonu vede k vyšší viskozitě a obtížné mísitelnosti, což pak negativně ovlivňuje pevnostní vlastnosti. Neuspokojivé výsledky směsi LK15 znamenaly, že další zvyšování přídavku metakaolinu spolu s přidáním betonu jako plniva nebylo vhodné. Vzorky metakaolinu a vytvrzené vzorky geopolymeru s přídavkem betonu byly analyzovány na rentgenovém difraktometru za účelem porovnání složení metakaolinu a výsledného geopolymeru s betonem. Rentgenové difrakční spektrum metakaolinu Baucis LK je zná-



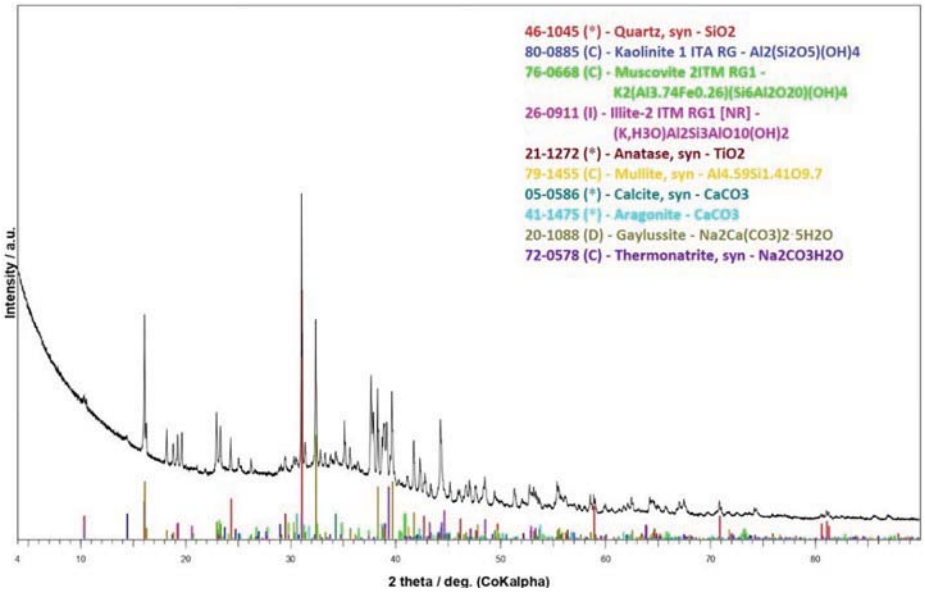
Obr 3. **Závislost pevnosti v tlaku na složení geopolymerů.** LK – metakaolin L05 se sodnodraselným aktivátorem, LBNa – metakaolin LB05 se sodným aktivátorem, LNa – metakaolin L05 se sodným aktivátorem



Obr. 4. **Vliv doby vytvrzování na pevnost v tlaku studovaných geopolymerů**



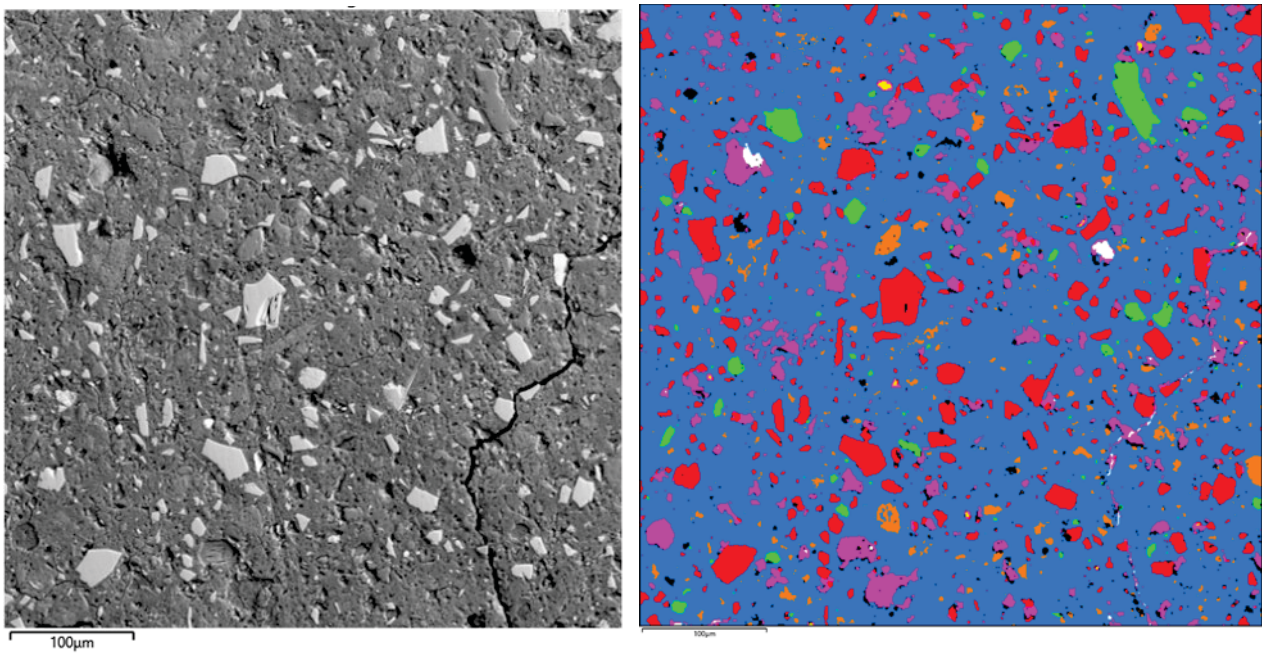
Obr. 5. **XRD analýza LK matrice s metakaolinem**



Obr 6. **XRD analýza baucisu LK s betonovou sutí**

zorněno na obr. 5 a výsledného geopolymeru na obr. 6. Analýza prokázala přítomnost gaylussitu a termonatritu ve výsledném geopolymeru. Termonatrit je evaporit sestávající z uhličitanu sodného a gaylusit je hydratovaná forma uhličitanu sodno-vápenatého, který je obvykle nestabilní a tvoří se v rané fázi aktivované geopolymerní pasty. Poté se pomalu rozkládá na H_2O a dále vzniká $CaCO_3$ jako stabilní kalcit nebo aragonit. Tyto dva minerály jsou obvykle přítomny v geopolymerech, kde je přítomen alkalický aktivátor obsahující sodík.

Obr. 7 ukazuje analýzu BSE (Back Scattered Eelectrons – zpětně odražené elektrony) s fázovým profilem. Geopolymerní matrice obsahovala pouze 78,4 % povrchu obrazu akermatinitu + merwinitu 8,9 %, křemenu 1,8 %, kaolinitu 2,2 % a kalcitu 2,2 % a nestanovená fáze Na-Ca-CO vzrostla na 6,3 %. Toto fázové složení vysvětluje nižší pevnost



Obr. 7. **BSE analýza geopolymeru LK10 s 20 hm. % betonové suti.** Fialové části představují fázi Na-Ca-CO, která pokrývá většinu části směsi

v tlaku vzorků, protože uhličitanová fáze s vysokým efektem bobtnání vykazuje vyšší absorpci vody a hydratace uhličitanu sodného způsobuje zvětšování objemu. Tento efekt způsobuje praskliny v geopolymerní matrici.

Závěr

V tomto textu jsou shrnuty informace o možnostech využití stavebního odpadu z vyřazování jaderných zařízení z provozu. Je vysvětlen proces třídění pro recyklaci a jsou nastíněny možné metody nakládání s různými kategoriemi odpadu. Bylo prokázáno, že převážná většina tohoto odpadu může být znovu použita, a to především v konvenčních recyklačních zařízeních. Ostatní kategorie stavebního odpadu lze stabilizovat a uložit v podzemních úložištích. Dále v tomto textu je popsáno několik experimentů s cílem určit vhodnost použití komerčně dostupných geopolymerů Baucis pro přímou stabilizaci betonové sutě. Po počátečním testování tří různých geopolymerů Baucis LK, LNa a LBNa byl vybrán Baucis LK na základě nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku 50 až 80 MPa. Tyto hodnoty naznačují, že výsledný produkt by byl odolný i v případě neočekávané události. Vliv doby vytvrzování byl stanoven tak, že vzorky geopolymeru LK byly vytvrzovány po různou dobu. Pevnost v tlaku se s délkou vytvrzování zvyšovala. V tomto experimentu vzorky LK10 a LK15 vykazovaly vyšší pevnost v tlaku o hodnotách 55, 58 a 74 MPa (LK10) a 60, 72 a 82 MPa (LK15) ve srovnání s LK5 s hodnotami 49, 60 a 68 MPa po 7, 14 a 21 dnech vyzrávání. Směsi LK10 a LK15 byly proto použity pro přímou stabilizaci betonu. V experimentech s přímou stabilizací byl metakaolin nahrazen 5, 10, 15, 20, 25 a 30 hm. % betonové sutě. V případě přidání 5, 25 a 30 hm. % sutě byly vzorky LK10 výrazně odolnější s hodnotami 60, 58 a 59 MPa než LK15 s hodnotami 39, 23 a 16 MPa. V případě 10, 15 a 20 hm. % byly hodnoty pevnosti v tlaku vzorků LK10 a LK15 podobné. Provedené rentgenové difrakční analýzy potvrdily přítomnost gaylussitu po 7 dnech vytvrzování, což by naznačovalo pozitivní vliv na stabilitu geopolymeru, je však nutné jeho přítomnost dále testovat u vzorků s delší dobou vytvrzování. Dále je třeba provést další experimenty spolu s další analýzou vytvrzených vzorků, jako jsou vyluhovací experimenty a testy radiační stability. Dále je třeba sledovat i vliv složení betonu na možnosti stabilizace, kde se především projevuje odlišnost použitého kameniva.

Předkládaná práce byla realizována v rámci institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky a s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LM2023041.

LITERATURA

1. Ministry of the Environment of the Czech Republic. (2021). *Decree No. 273/2021 Coll., on Details of Waste Management*, Annex 4E. Prague: Ministry of the Environment. https://mze.gov.cz/public/portal/

mze/legislativa, staženo 13. 10. 2025.
2. Beton (2012). *Těžké betony a speciální stínící betony*. www.ebeton.cz/clanky/2012_7_134_tezke-betony-a-specialni-stinici-betony, staženo 13. 10. 2025.
3. International Atomic Energy Agency. *Methodologies for Assessing the Induced Activation Source Term for Use in Decommissioning Applications* (Safety Reports Series No. 95). IAEA, Vienna 2019.
4. Rapant T.: *Bohunice V1 NPP Decommissioning: Removal of Activated and Contaminated Concrete in the Unit 1 and Unit 2 Reactor Shafts*. Presented at the International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future, IAEA, 15.05. – 19.05. Vienna 2023.
5. International Atomic Energy Agency. *Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities* (IAEA-TECDOC-1602). IAEA, Vienna 2008.
6. International Atomic Energy Agency. *Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes* (Technical Reports Series No. 389). IAEA, Vienna 1998.
7. Eng T., Pescatore C.: *The Specificity of Decommissioning Waste for Disposal and from Different Facilities*. In Proceedings of the International Symposium on Disposal of Low Activity Radioactive Waste, Córdoba, Spain, 13–17 December 2004.
8. Parliament of the Czech Republic. (2016). *Act No. 263/2016 Coll., Atomic Act*. Prague: Ministry of the Interior. https://sujb.gov.cz/legislativa, staženo 13. 10. 2025.
9. State Office for Nuclear Safety. (2016). *Decree No. 377/2016 Coll., on Requirements for Safe Management of Radioactive Waste and Decommissioning of Nuclear Facilities or Sites of Category III or IV*. Prague: SÚJB. https://sujb.gov.cz/legislativa, staženo 13. 12. 2025.
10. State Office for Nuclear Safety. (2016). *Decree No. 422/2016 Coll., on Radiation Protection*. Prague: SÚJB. https://sujb.gov.cz/legislativa, staženo 13. 10. 2025.
11. International Atomic Energy Agency. *Application of the Concept of Clearance* (IAEA Safety Standards Series No. GSG-18). IAEA, Vienna 2023.
12. International Atomic Energy Agency. *Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels* (Safety Reports Series No. 67). IAEA, Vienna 2013.
13. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP Publication 103). *Annals of the ICRP*, 37(2–4). 2007.
14. European Commission. *Radiation Protection 122 – Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption – Part 1: Guidance on General Clearance Levels for Practices*. Directorate-General Environment, 2000.
15. OECD Nuclear Energy Agency (NEA). *Release of Radioactive Materials and Buildings from Regulatory Control – A Status Report* (NEA No. 6403). OECD Publishing, Paris 2008.
16. Krištofová K., Rapant T., Svitek J.: *Radiological Characterization of V1 NPP Technological Systems & Buildings – Activation*. Presented at the Workshop on Radiological Characterisation for Decommissioning, Studsvik, Sweden, 17–19 April 2012.
17. International Atomic Energy Agency. *Decommissioning of Pools in Nuclear Facilities* (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.6). IAEA, Vienna 2015.
18. International Atomic Energy Agency. *Classification of Radioactive Waste* (IAEA Safety Standards Series No. GSG-1). IAEA, Vienna 2009.
19. OECD Nuclear Energy Agency (NEA). *Recycling and Reuse of Materials Arising from Decommissioning of Nuclear Facilities* (NEA No. 7310). OECD Publishing, Paris 2021.
20. Ulm F. J., Heukamp F. H., Germaine J. T.: Nucl. Eng. Des. *211*, 51 (2002).
21. Vance E. R., Perera D. S., v knize: *Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications* (John L. Provis, Jannie S. J. van Deventer, ed.), kap. 18, str. 401. CRC Press, Boca Raton 2009.
22. Krishna R. S., Mishra J., Zribi M., Adeniyi F., Saha S., Baklouti S., Shaikh F. U. A., Gökçe H. S.: Materialia *20*, 101212 (2021).
23. Mohapatra S. S., Mishra J., Nanda B., Patro S. K.: Mater. Today: Proc. *56*, 440 (2022).
24. Girke N. A., Steinmetz H.-J., Bukaemsky A., Bosbach D., Hermann E., Griebel I., v knize: *Processing of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal, Results of a Coordinated Research Project*. Companion CD-ROM, International Atomic Energy Agency 2016.
25. Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D. M. J., Rangan B. V.: Aust. J. Str. Ing. *6*, 77 (2005). doi: 10.1080/13287982.2005.11464946.
26. Albidah A., Alghannam M., Abbas H., Almusallam T., Al-Salloum Y.: J. Mater. Res. Technol. *10*, 84 (2021).

J. Hadrava and L. Nachmilner *(Research Centre Řež, Husinec-Řež, Czech Republic):* **Recycling and Stabilization of Construction and Demolition Wastes from Nuclear Facilities**

The upcoming decommissioning of nuclear facilities requires, among other things, careful planning for the management of resulting demolition waste. Some of this waste may be contaminated with radionuclides, and its reuse depends on clear evidence that it poses no threat to environmental safety. Uncontaminated waste, on the other hand, can be recycled without restrictions. Decisions regarding the final disposal of various categories of construction and demolition waste (CDW) are based on procedures outlined in legislative documents issued by the State Office for Nuclear Safety (SÚJB).

This article identifies the types of CDW that may arise during the dismantling of nuclear reactors, along with the radionuclides that may be responsible for contamination. International experience shows that most of the waste can be reused without restrictions. For the remainder, it is necessary to decide whether it can be used in a limited manner for selected types of construction, or whether it must be placed in radioactive waste repositories. Examples of reuse include filling voids in storage facilities or using as a foundation layer in new constructions. Other types of waste can then be effectively stabilized in advanced matrices, which are the subject of this work. However, in later years this option will be gradually replaced by recycling techniques.

Keywords: recycling, construction and demolition waste, radioactive waste, stabilizations

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

Chemické Listy
Chemický průmysl
www.chemicke-listy.cz

STAV VÝVOJE TECHNOLOGIE PLYNEM CHLAZENÝCH RYCHLÝCH REAKTORŮ V ČESKU A EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Tomáš Melichar

Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, Česká republika
tomas.melichar@cvrez.cz

Došlo 10.10.25, přijato 12.11.25.

V rámci uskupení V4G4 Centre od Excellence, které má zastoupení i v České republice, je vyvíjen koncept rychlého plynem chlazeného reaktoru typu GFR (Gas-cooled Fast Reactor). Vývoj probíhá v různých technologických oblastech a cílem je dosažení demonstrátoru zvaného ALLEGRO o výkonu 75 MW. V tomto článku je popsán stav vývoje GFR technologie s důrazem na aktivity probíhající v Česku, které zahrnují například technologický vývoj, studie chemických režimů a materiálové kompatibility. Jednou z nejvýznamnějších činností je experimentální provoz zařízení S-Allegro, které je provozované Centrem výzkumu Řež v Plzni. Jedná se o zmenšenou, elektricky vyhřívanou maketu reaktoru ALLEGRO o výkonu 1 MW, umožňující studie termohydraulického chování systému při běžných i havarijních podmínkách. Prezentovány jsou dosavadní experimentální výsledky a zmíněna je i návaznost na další aktivity v oblasti vývoje GFR technologie.

Klíčová slova: pokročilé jaderné reaktory, plynem chlazený rychlý reaktor, GFR, Gas-cooled Fast Reactor, termohydraulické experimenty, chlazení heliem

Úvod

Rychlý plynem chlazený reaktor (GFR, Gas-cooled Fast Reactor) je jedním z konceptů pokročilých reaktorů tzv. Generace IV. Cílem reaktorů Generace IV je zajištění konkurenceschopnosti jaderných energetických reaktorů, vysoká bezpečnost a spolehlivost, zvýšená ochrana proti zneužití, udržitelnost a efektivní nakládání s jaderným palivem včetně možností jeho přepracování a opakovaného využití (cit.[1]). Byť rozvoj a energetické využití takových reaktorů stále není otázkou blízké budoucnosti, jejich případná implementace má stále potenciál významného přispění k dosažení udržitelné a nízkoemisní energetiky. Do skupiny Generace IV patří šest konceptů, lišících se ve svém uspořádání, provozních parametrech, použitých materiálech a médiích a dalších technických a ekonomických parametrech. Článek se dále věnuje konceptu GFR, konkrétně pak stavu vybraných vývojových aktivit, jejichž těžiště je položeno v zemích Visegrádské skupiny s významným přispíváním českých výzkumných organizací. Pozornost je věnována především výzkumu v oblasti bezpečnostních aspektů spojených s efektivním odvodem zbytkového tepla při případných haváriích a nenominálních stavech, k čemuž slouží významná a velkoformátová experimentální infrastruktura provozovaná Centrem výzkumu Řež. Kromě toho je však uveden i širší náhled na technologii z hlediska její aplikovatelnosti a současných směrů vývoje a výzkumu.

Koncept plynem chlazeného rychlého reaktoru

Jedná se o reaktor využívající rychlé spektrum neutronů pro štěpení, tedy bez přítomnosti moderátoru v aktivní zóně. Jako palivo může být použit buď obohacený uran, nebo přepracované palivo složené z oxidu uraničitého a plutoničitého, tzv. MOX palivo. Samotné palivo se významně neliší od jiných typů reaktorů, a to jak svým složením, tak ani geometricky, kdy se předpokládá použití slisovaných pelet vertikálně umístěných v matricích palivových proutků. Koncept GFR umožňuje velmi kompaktní uspořádání aktivní zóny a relativně vysoké výkonové hustoty. Důležitým specifikem konceptu GFR, které vyžaduje zvýšenou pozornost v oblasti výzkumu a vývoje, je však právě materiál pokrytí palivových pelet. Pokrytí tvoří kromě samotné struktury paliva první ochrannou bariéru a musí být rezistentní nejen k již velmi vysokým teplotám při běžném provozu, ale odolnost musí být prokázána při ještě extrémnějších podmínkách odpovídajícím potenciálním haváriím. Jako vhodný kandidát pro vysokoteplotní pokrytí je karbid křemíku v kompozitním provedení SiC/SiC vláken v matrici, a to zejména z hlediska termomechanických a neutronově-fyzikálních vlastností. Avšak výrobní postupy je třeba dále zdokonalovat tak, aby byla právě zajištěna a spolehlivě prokázána strukturální pevnost v různých režimech provozu. Druhý vysokoteplotní koncept reaktorů Generace IV, rovněž heliem chlazený reaktor typu HTGR (High-Temperature Gas-cooled

Reactor), tuto problematiku řeší obalením paliva do grafitových kuliček, následně slisovaných do pevných struktur. Grafit zde plní roli moderátoru, jelikož palivo je zde štěpeno neutrony v tepelném spektru. Tento princip byl již v praxi ověřen, například u japonského experimentálního reaktoru HTTR (High-Temperature engineering Test Reactor) (cit.[2]), nebo pilotního energetického reaktoru HTR-PM (High-Temperature gas-cooled Reactor – Pebble bed Module) v Číně spuštěného v roce 2023 (cit.[3]). Avšak určitou nevýhodou proti GFR reaktoru je nutnost udržování chemického režimu chladiva a jeho kontinuálního čištění od uvolňujícího se grafitu. Ostatní reaktory Generace IV jsou provozovány na nižší teplotě a lze tak využít například pokrytí z nerezové oceli. Při nižších teplotách však může být provozován i GFR reaktor, což může být vhodná strategie především pro úvodní fáze provozu, kdy některé technologie charakteristické vysokoteplotní odolností nemusí být na dostatečném stupni vývoje.

Jako chladivo je využito helium, což do velké míry ovlivňuje uspořádání celého systému a přináší řadu výhod i nevýhod. Výhodou je bezesporu inertní charakter plynu, kdy i při vysokých teplotách dochází k nízké degradaci konstrukčních materiálů. Zároveň se jedná o netoxické, nehořlavé a nevýbušné médium. Helium je relativně dostupné a ani jeho rostoucí cena by vzhledem k poměrně malému potřebnému množství neměla znamenat překážku v jeho použití u této aplikace. Mezi plyny má nejvyšší tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu, což je výhodné z pohledu přenosu tepla, avšak negativním faktorem je v tomto ohledu velmi nízká hustota. Proto je třeba systém provozovat za zvýšeného tlaku (7 MPa), kdy je hustota oproti atmosférickému tlaku až 70ti násobná. Vysokotlaký charakter reaktorové nádoby, heliových okruhů a dalších komponent klade zvýšené nároky na konstrukci, volbu materiálů i samotný provoz. Vlivem zvýšeného tlaku v kombinaci s malou molekulou helia je nutné věnovat zvláštní pozornost prevenci úniků helia ze systému prostřednictvím vhodných metod těsnění. Kombinace vysokého tlaku a teploty pak vyžaduje konstrukčně komplikované řešení potrubí i dalších komponent. Dostupné materiály neumožňují dlouhodobý provoz na plných parametrech. Řešením je snížení provozní teploty tlakového rozhraní koaxiálním uspořádáním potrubí. Horké helium vystupující z reaktorové nádoby proudí uvnitř koaxiálního potrubí, zatímco ochlazené helium proudící směrem k reaktoru proudí vně. Vnitřní horké potrubí je tak namáháno pouze teplotou a tlakové zatížení je přeneseno pouze na vnější, chladnější stěnu. Vnitřní potrubí je pak vystaveno vysoké teplotě, ale nízkému tlaku odpovídajícímu pouze tlakové ztrátě okruhu, resp. rozdílu tlaku mezi horkou a studenou větví. Pro zajištění efektivity provozu je však dále potřeba obě větve tepelně izolovat, což rovněž komplikuje konstrukční řešení.

Reaktorová nádoba je uspořádána podobně jako u tlakovodních reaktorů. Studené helium vstupuje v horní části reaktoru do sestupné šachty. Ve spodní části se směr proudění otáčí a helium vstupuje do aktivní zóny, kde proudí zdola nahoru. Po ohřátí v aktivní zóně helium proudí vnitřní větví primárního okruhu do primárního tepelného výměníku. Zde předá teplo sekundárnímu okruhu a vnější větví proudí směrem k sání primárního cirkulátoru, který usměrňuje chladivo zpět do reaktorové nádoby. Sekundární okruh je již koncipován jako energetický konverzní okruh s plynovou turbínou. Důležitým prvkem je tzv. DHR okruh (Decay Heat Removal), který má bezpečnostní funkci a slouží k zajištění pasivního odvodu tepla z aktivní zóny v případě havárie. Jedná se o vertikální koaxiální potrubí připojené k reaktorové nádobě, v horní části opatřené tepelným výměníkem pro odvod tepla. Spolehlivost tohoto systému je rovněž předmětem intenzivního výzkumu a jeho princip bude vysvětlen v dalších částech tohoto článku.

Výhody a aplikace

Koncept GFR je rychlý reaktor a má tedy potenciál provozu v tzv. uzavřeném palivovém cyklu, kdy použité jaderné palivo lze do určité míry přepracovat a opakovaně využít. Tím by mohlo dojít k zajištění udržitelnosti z hlediska omezení nutnosti dlouhodobého ukládání vyhořelého paliva např. v hlubinných úložištích a zároveň k úspoře primárního zdroje ve formě přírodního uranu. Dalším specifikem je vysoká provozní teplota chladiva, kdy helium na výstupu z aktivní zóny v cílené konfiguraci dosahuje až 850 °C. Současně provozované jaderné reaktory jsou využívány k produkci elektrické energie a ve velmi omezené míře pro vytápění. Vysokoteplotní reaktory mají výrazně širší možnosti uplatnění, neboť poskytují teplo s vysokým energetickým potenciálem vhodné pro přímé využití v průmyslových procesech. V chemickém průmyslu se jedná například o výrobu ethylenu, styrenu, titanové běloby nebo kyseliny sírové. Mimo chemický průmysl má vysokopotenciální teplo využití například při výrobě cementu, v metalurgii, sklářském nebo i papírenském průmyslu. Uvedené provozy jsou ze své podstaty energeticky náročné a vítají jakoukoliv iniciativu vedoucí k úsporám energie. Řada z uvedených provozů má strategický význam a lze předpokládat, že v České republice zůstanou v nějaké míře zachovány i do budoucna.

Další aplikací je možnost výroby vodíku jakožto nositele energie prostřednictvím vysokoteplotní elektrolýzy nebo termochemickým způsobem. Samozřejmě je možný provoz primárně pro produkci elektrické energie. V tomto případě lze díky vysokým teplotám v případě volby vhodného uspořádání konverzního oběhu dosáhnout výrazně vyšší účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou, než tomu je například u tlakovodních reaktorů. Zajímavá je pak možnost provozu v hybridním režimu, kdy by došlo ke kombinaci více zmíněných aplikací. Zapojením různých typů akumulace energie může být dosaženo flexibility zdroje, čímž může být dle aktuální potřeby energetiky nebo průmyslu řízen výkon a typ výstupních energií při držení konstantního výkonu reaktoru. Tím je zajištěna maximalizace životnosti komponent primárního okruhu a optimalizace vyhoření paliva.

Vhodným principem akumulace energie ve spojení s GFR reaktorem je střednědobé ukládání energie ve formě tepla, kdy vysokoteplotní akumulační jednotku lze zapojit například mezi primární a sekundární okruh, a tím umožnit proměnný průtok média sekundárního okruhu a tedy i výstupního výkonu při konstantním průtoku okruhem primárním. Vhodným akumulačním médiem je například roztavená dusičnanová sůl nebo materiál v pevném skupenství kompatibilní s provozním teplotním rozsahem technologických okruhů. Tepelnou akumulaci je možné kombinovat s dalšími principy, například s elektrochemickými bateriemi pro krátké nabíjecí a vybíjecí cykly nebo s chemickým principem reprezentovaným vysokoteplotní elektrolýzou a produkcí vodíku nebo jiného nositele energie s možností dlouhodobé akumulace. Vhodnou kombinací akumulačních a konverzních technologií lze GFR reaktor provozovat flexibilně v různých podmínkách a aplikacích.

Výzkum a vývoj technologie plynem chlazeného rychlého reaktoru

Vývoj konceptu GFR v Evropě je soustředěn a koordinován v rámci konsorcia V4G4 Centre of Excellence zahrnujícího výzkumné organizace z Česka, Maďarska, Polska a Slovenska. Česko v konsorciu zastupuje ÚJV Řež a Centrum výzkumu Řež. Obě organizace hrají ve vývoji GFR technologie významnou roli. Do vývoje je však zapojeno mnoho dalších organizací a zemí v rámci projektů podpořených Evropskou komisí. I v Česku je téma vývoje vysokoteplotních heliových reaktorů v posledních dekádách hojně zastoupeno národními výzkumnými projekty s účastí řady výzkumných organizací, univerzit a průmyslu. V oblasti GFR je společným cílem vývoj demonstračního reaktoru ALLEGRO, který by měl mít tepelný výkon 75 MW a měl by demonstrovat provozuschopnost, spolehlivost a bezpečnost konceptu a validovat klíčové komponenty včetně inovativního paliva a materiálů[4]. Výzkumné a vývojové činnosti probíhají paralelně v několika oblastech zahrnujících návrh a optimalizaci aktivní zóny včetně paliva a palivového cyklu, výzkum a testování materiálů, termohydraulické analýzy s důrazem na studie spolehlivého odvodu tepla při normálních i havarijních podmínkách, inženýrské návrhy komponent, bezpečnost včetně proliferace jaderného materiálu a v neposlední řadě je důraz kladen na vzdělávání a předávání zkušeností mezi generacemi. Aktuálně řešeným projektem na evropské úrovni je projekt TREASURE, který zahrnuje velkou část zmíněných aktivit řešených v konsorciu významných partnerů. Kromě úzkého týmu V4G4 CoE například také University of Cambridge, Framatome zapojený do optimalizace paliva nebo český Státní úřad pro jadernou bezpečnost, jehož rolí je předběžné posouzení technologie z hlediska bezpečnosti na základě výsledků získaných při řešení projektu[5]. Kromě Evropy je výzkum GFR technologie relativně omezený. Koncept je rozvíjen pouze v USA, především společností General Atomics vyvíjející rychlý modulární reaktor typu GFR (cit.[6]).

Z hlediska jednotlivých výzkumných aktivit v Česku je v oblasti vývoje GFR technologie věnována pozornost především návrhu komponent zahrnujících tepelné výměníky, bezpečnostní prvky včetně například tzv. lapače koria, ale i tlakové ochranné obálky reaktoru nebo těsnicích elementů. Rozsáhlé aktivity jsou zaměřeny na materiálový výzkum jako jednu z klíčových potřeb před případnou implementací technologie. České výzkumné organizace disponují zařízeními umožňujícími simulování podmínek odpovídajících prostředí vysokoteplotních reaktorů a lze tak provádět testování konstrukčních materiálů, ale například i SiC/SiC materiálů. ÚJV Řež položil základy vlastnímu národnímu konceptu GFR reaktoru s názvem HeFASTo (cit.[7]). V tomto případě se jedná o potenciální návazný projekt k reaktoru ALLEGRO, který již bude mít plně energetické využití s tepelným výkonem 200 MW a maximální teplotou helia 900 °C (cit.[8]). Ačkoliv se jedná o dlouhodobou výzkumnou činnost, již nyní je registrován zájem o technologii z řad chemického průmyslu a energetiky a aktivně probíhají studie uplatnitelnosti.

České výzkumné organizace jsou silně orientované na experimentální činnost a disponují infrastrukturou, která je zásadní nejen ve skupině V4G4 Centre of Excellence, ale má prakticky i celosvětový dopad v oblasti výzkumu GFR. Největší a nejunikátnější infrastrukturou je zařízení S-Allegro, které je klíčovým elementem pro výzkum termohydraulické bezpečnosti, ověření fyzikálních principů spojených s přestupem tepla ve vysokoteplotních heliových reaktorech a testování komponent. Zařízení je využíváno primárně v rámci rozvoje demonstračního rektoru ALLEGRO, nicméně je plně využitelné i pro jakékoliv jiné návrhy GFR technologie.

Zařízení S-Allegro

S-Allegro je velké experimentální zařízení určené k termohydraulickému výzkumu vysokoteplotních heliových reaktorů. Zařízení provozuje Centrum výzkumu Řež v Plzni. Jedná se o neaktivní, elektricky vytápěnou maketu GFR reaktoru v konfiguraci a provozních parametrech odpovídajících vyvíjenému demonstrátoru ALLEGRO, která je z hlediska tepelného výkonu škálována v měřítku 1:75. To odpovídá maximálnímu výkonu topné sekce 1 MW. Cílem zařízení jsou studie termohydraulického chování reaktorového systému při nominálních, nenominálních i havarijních stavech. Umožněny jsou studie základních fyzikálních jevů spojených s přenosem tepla a prouděním chladiva, ale i simulace velmi komplexních systémových stavů zahrnujících vážné havárie a zapojení systémů pro zmírnění jejich následků.

Zařízení S-Allegro umístěné v experimentální hale Centra výzkumu řež v Plzni je uvedeno na obr. 1.

Jádrem zařízení je reaktorová nádoba opatřená topnou sekcí s elektrickým odporovým topením, které simuluje aktivní zónu reaktoru. K reaktorové nádobě je připojen primární okruh s hlavním cirkulátorem zajišťujícím nucenou konvekci helia jako primárního chladiva. Okruh je

Obr. 1. **Zařízení S-Allegro**

provozován na maximálním tlaku 7 MPa, teplotě 850 °C a průtoku 0,5 kg s^{-1}. Teplo z primárního okruhu je předáváno do okruhu sekundárního, jehož pracovní médium je rovněž helium o podobných maximálních parametrech. Ze sekundárního výměníku je teplo předáváno do vodního terciálního okruhu. Díky tomuto uspořádání lze studovat součinnost jednotlivých okruhů při různých provozních stavech.

S primárním okruhem je hydraulicky propojen okruh pro odvod zbytkového tepla, tzv. DHR okruh (Decay Heat Removal), rovněž připojený k reaktorové nádobě. Tento okruh je hlavním pasivním bezpečnostním prvkem GFR reaktoru a umožňuje odvod zbytkového tepla při havarijních stavech spojených s výpadkem napájení prostřednictvím přirozené cirkulace helia. V případě takové havárie dojde k výpadku cirkulátoru zajišťujícího průtok helia aktivní zónou a je nutné reaktor odstavit. I po odstavení však vzniká zbytkové teplo, které je třeba efektivně odvádět tak, aby nedošlo v krajním případě až k roztavení jaderného paliva. Vertikální okruh pro odvod zbytkového tepla umožní ustavení přirozené cirkulace na základě rozdílu teplot, potažmo hustot helia mezi reaktorovou nádobou a tepelným výměníkem umístěným v horní části okruhu. Jedná se o relativně složitý jev, který je ovlivněn mnoha parametry a jeho modelování pomocí výpočetních nástrojů je komplikované. Proto je nutná dostupnost experimentálních dat, pomocí kterých je možné validovat teoretické předpoklady a výpočetní nástroje a přispět tak k výzkumu jaderné bezpečnosti GFR reaktorů.

S-Allegro dále umožňuje simulování nestandardních provozních podmínek celého systému. K dispozici je systém umožňující simulaci havárie spojené s únikem chladiva, ztrátou průtoku chladiva nebo výpadkem či poruchou komponent. Sledována je pak reakce systému při definovaném havarijním režimu. Systémem pro zmírnění následků havárie zahrnuje například havarijní vstřikování těžšího plynu (dusíku), čímž lze intenzifikovat odvod tepla při ztrátě chladiva.

Jedním z hlavních přínosů experimentálního provozu je tak produkce dat pro hodnocení spolehlivosti výpočetních nástrojů, které jsou dále využívány pro návrh již reálných jaderných reaktorových systémů. Na základě dat jsou výpočetní nástroje hodnoceny, validovány a případně vylepšovány. Další důležitou funkcí je testování komponent při relevantních provozních podmínkách. Vzhledem k paralelnímu vývoji v oblasti materiálů nebo výrobních technologií se v některých případech přistupuje k inovativním řešením, která je však třeba testovat a kvalifikovat, což zařízení v rámci provozních parametrů rovněž umožňuje.

Zařízení S-Allegro bylo realizováno v rámci projektu SUSEN – Udržitelná energetika. Projekt byl řešen ve dvou fázích v letech 2011–2017 a financován s podporou Evropské unie a vlády České republiky z operačních programů „Výzkum a vývoj pro inovace“ a „Výzkum, vývoj a vzdělávání“ řízených Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy. Cílem bylo posílení výzkumné infrastruktury v energetice[9]. Před zahájením projektu byly identifikovány výzkumné potřeby vybraných jaderných energetických směrů a jednou z nich byla právě potřeba integrálního velkoformátového zařízení pro podporu vývoje GFR technologie. Zařízení bylo dodáno společností ATEKO a předáno bylo v roce 2017. Vzhledem ke komplexní povaze a extrémním provozním parametrům bylo dalších několik let věnováno provozní optimalizaci a drobným úpravám jednotlivých částí tak, aby bylo možné efektivně a bezpečně realizovat experimenty identifikované jako klíčové pro rozvoj GFR technologie. Od roku 2021 pak probíhá plnohodnotný provoz, který prozatím gradoval provedením komplexních experimentů spojených se simulací havarijních stavů v roce 2024 v rámci evropského projektu SafeG (cit.[10]).

Výsledky experimentálního výzkumu

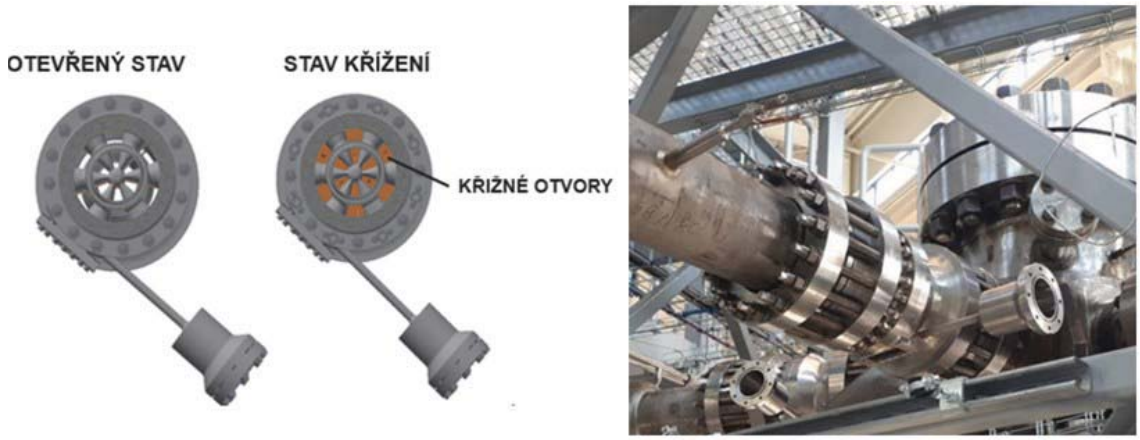
S-Allegro je od roku 2019 využíváno v rámci několika národních a evropských projektů. Postupně je plněna experimentální matice definovaná konsorciem V4G4 Centre of Excellence a dochází ke zkvalitňování dat postupným vylepšováním a odstraňováním výzkumných nejistot. Jak již bylo zmíněno, první provoz byl spojen převážně s optimalizací funkčnosti součástí a řídicího systému a získáváním provozních zkušeností operátorů. Byly provedeny i úpravy některých komponent a optimalizovány provozní postupy. Jedny z prvních experimentů byly realizovány v rámci projektu podpořeného Technologickou

agenturou ČR s názvem „*TK01030116 – Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO*“. Jednou z aktivit projektu byla optimalizace komponenty zvané křížový ventil. Jedná se o součást, která během nominálního provozu umožňuje přesměrování toku v koaxiálním potrubí, čímž se zajistí minimální průtok i okruhem pro odvod zbytkového tepla. V případě havárie spojené s výpadkem napájení se křížový ventil přestaví do otevřené polohy a díky tomu, že je v tomto okruhu již ustaven malý průtok helia, dojde v něm k rychlejšímu nástupu přirozené cirkulace a efektivnějšímu odvodu zbytkového tepla[11]. Křížový ventil byl vyvinut a patentován Centrem výzkumu Řež a v rámci zmíněného projektu byl otestován přímo na zařízení S-Allegro a následně byla optimalizována jeho konstrukce. Jedná se o relativně komplikovanou komponentu, která musí odolat vysokým tlakům a teplotám a zároveň musí být kompatibilní s koaxiálním charakterem potrubí. Aby byla dostatečně kompenzována vysoká termomechanická napětí, všechny potrubní trasy vysokoteplotních heliových reaktorů jsou řešeny koaxiálně. Křížový ventil, stejně tak jako celé zařízení, byl následně využíván v rámci navazujících experimentů. Model křížového ventilu v otevřeném stavu, v křížícím stavu a jeho instalace mezi reaktorovou nádobou a okruhem pro odvod zbytkového tepla je zobrazen na obr. 2.

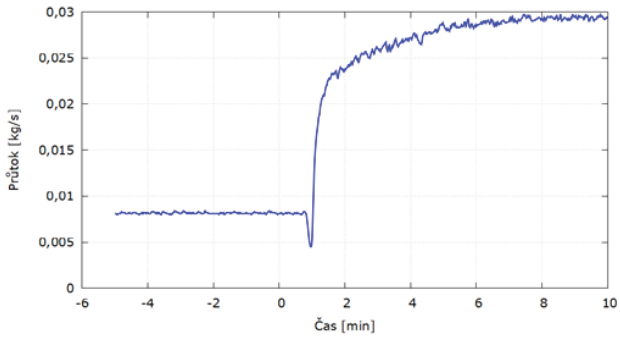
Komplexní experimenty byly provedeny v rámci evropského projektu SafeG. V první fázi byla ověřena data pro základní ladění výpočetních kódů a modelů. Především se jednalo o charakteristiky tepelných výměníků, jakožto geometricky nejsložitějších komponent, které ovlivňují chování celého systému. Následoval experiment zaměřený na hodnocení efektivity odvodu tepla přirozenou cirkulací helia při různých tlakových hladinách odpovídajících potenciální havárii se ztrátou chladiva (tzv. LOCA havárie). Čím nižší je tlak helia, tím horší je odvod tepla, roste teplota chladiva, a především teplota topných elementů (v případě reálného reaktoru roste teplota jaderného paliva). Měřeny byly průtoky při různých tlacích a sledován byl průtok způsobený přirozenou cirkulací helia a teplotní pole v reaktorové nádobě a celém okruhu pro odvod zbytkového tepla.

Dalším experimentem byla simulace vzniku a šíření přechodového stavu z nominálního provozu, kdy je v součinnosti primární, sekundární a terciální okruh v ustáleném stavu (což odpovídá běžnému energetickému provozu reaktoru). Následná iniciační událost odpovídá stavu výpadku napájení následovaná výpadkem hlavního cirkulátoru a snížením výkonu topné sekce, resp. reaktoru, na výkon odpovídající zbytkovému teplu. Jedná se o případ s havarijním odstavením reaktoru. Již během nominálního provozu je pomocí křížového ventilu zajištěn mírný průtok chladiva okruhem pro odvod zbytkového tepla. Jak bylo uvedeno výše, tento průtok ale není dostatečný pro uchlazení topných elementů, resp. jaderného paliva, a proto dochází ke změně polohy koaxiálního ventilu na primárním potrubí z otevřeného stavu do zavřeného a současně se otevírá křížový ventil. Tím je umožněn maximální průtok vertikálním okruhem pro odvod zbytkového tepla. Poté dochází k ustavování přirozené cirkulace a k dlouhodobému odvádění zbytkového tepla, jehož výkon pozvolna klesá. Rychlost ustavení dostatečně intenzivní přirozené cirkulace je klíčová pro dochlazení aktivní zóny v prvních vteřinách a minutách havarijního stavu.

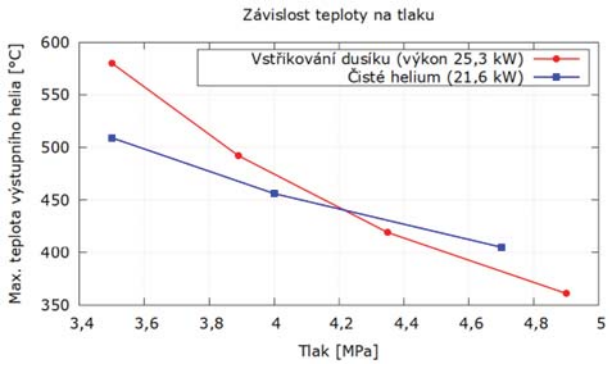
Průběh průtoku helia v okruhu pro odvod zbytkového tepla je znázorněn na obr. 3. První fáze odpovídá nominálnímu provozu, kdy okruhem protéká pouze malá část průtoku přes křížový ventil. V čase 0 s bylo zahájeno spuštění iniciační události, tj. odstavení primárního cirkulátoru, pokles výkonu a přestavení koaxiálních ventilů. Přibližně v čase 1 min je vidět krátký pokles průtoku, což je dáno právě přestavováním pozice ventilů a průtok byl tak krátkodobě omezen. Následně však začne průtok rychle narůstat a relativně brzo se ustálí na vyšší hodnotě. Z experimentu je patrné, že přirozená cirkulace je ustavena v rámci několika minut, což je pozitivní poznatek s ohledem na uchlazení aktivní zóny při havarijních podmínkách.



Obr. 2. **Model křížového ventilu (vlevo) a křížový ventil instalovaný na zařízení S-Allegro**



Obr. 3. **Vývoj průtoku helia při ustavování přirozené cirkulace**



Obr. 4. **Porovnání vlivu vstřikování dusíku a provozu DHR okruhu na čistém heliu**

Následně byly provedeny experimenty s hodnocením vlivu vstřikování dusíku do okruhu pro odvod zbytkového tepla. Možnost vstřikování dusíku je součástí systému pro zmírnění následku těžkých havárií, kdy při ztrátě chladiva a poklesu tlaku je pasivně vtlačen těžší plyn a tím by mělo dojít k intenzifikaci přirozené cirkulace a odvodu tepla. Test byl zahájen při provozu na přirozené cirkulaci na nižší tlakové hladině (3,54 MPa). Po ustálení byl tlak zvýšen vnesením dusíku jako těžšího plynu postupně na 39,2 MPa, 44,1 MPa a 49,5 MPa při konstantním výkonu elektrického topení. Na každé tlakové hladině byly ustáleny hodnoty a byl sledován vliv vnosu dusíku na průtok a teplotní pole. Prokázán byl relativně významný vliv vnosu dusíku na efektivitu odvodu tepla, kdy při celkovém navýšení tlaku přibližně o 1 MPa došlo k poklesu výstupní teploty helia o více než 200 °C oproti provozu s čistým heliem.

Závislost maximální výstupní teploty helia z topné sekce na tlaku je znázorněna na obr. 4. Modrá křivka odpovídá provozu na přirozené cirkulaci čistého helia, červená značí nárůst tlaku vlivem vstřikování dusíku. V obou případech je evidentní pozitivní vliv nárůstu tlaku na odvod tepla, jelikož maximální teplota helia z topné sekce se snižuje. Dále je patrné, že vliv vnosu dusíku má výraznější efekt, než je růst tlaku čistého helia, a lze tak konstatovat, že havarijní vstřikování dusíku má pozitivní dopad na intenzitu chlazení.

Navazující aktivity

Experimentální aktivity s využitím zařízení S-Allegro budou pokračovat s cílem maximálního využití jeho potenciálu. Předpokládá se pokračování v provádění komplexních experimentů spojených se simulováním havarijních podmínek. Dalším experimentem bude simulace havárie se ztrátou chladiva, tzv. LOCA havárie na primárním okruhu, kdy při nominálním provozu dojde k náhlému otevření ventilu simulujícího prasklinu nebo jinou netěsnost okruhu. Tím prudce poklesne tlak a následně je cílem experimentu sledovat a vyhodnocovat reakce systému. Tento experiment bude rovněž možné kombinovat se zapojením systému pro snížení dopadu havárie. Od roku 2025 je pak zařízení S-Allegro součástí projektu koordinovaného Mezinárodní atomovou agenturou. Projektu se účastní 20 institucí z 15 zemí světa. Cílem je modelování zařízení S-Allegro pomocí různých termohydraulických nástrojů a jejich validace na datech získaných z provozu zařízení. Tím by mělo dojít k posílení výpočetních schopností a vylepšení nástrojů v komunitě zabývající se vysokoteplotními, plynem chlazenými reaktory. Kromě experimentů v původní konfiguraci se do budoucna počítá i s rozšířením experimentálních úloh. Jednou z posuzovaných možností je doplnění zařízení o nový okruh s testovací sekcí umožňující hydraulické testování makety paliva. Nominální průtok 0,5 kg s^{-1} přibližně odpovídá průtoku jedním palivovým souborem reaktoru ALLEGRO, nabízí se tak kvalifikační neaktivní testy palivových maket s cílem hodnocení tlakových ztrát a dalších kritických parametrů, jako jsou například vibrace paliva vlivem nerovnoměrného proudění helia. Vzhledem k tomu, že zařízení prakticky simuluje GFR reaktor v malém měřítku, je další zajímavou možností připojení doplňkového systému s potenciálem zvýšení energetické významnosti a studie synergie takového zařízení s reaktorovými heliovými okruhy. Nabízí se například akumulační technologie ve formě tepelných akumulačních zásobníků nebo vysokoteplotního elektrolyzéru.

Paralelně dále pokračují drobnější úpravy a vylepšení systému pro snížení experimentálních nejistot. Doplňována jsou nová čidla, postupně jsou implementovány také nové principy těsnění pro snížení nežádoucích úniků helia. Předpokládá se, že zařízení S-Allegro bude nadále klíčovou infrastrukturou v oblasti vývoje GFR technologie.

Závěr

Článek popisuje stav vývoje technologie rychlého, vysokoteplotního, plynem chlazeného reaktoru ve světě a především v Česku. Těžiště vývoje technologie v Evropě je soustředěno v rámci uskupení V4G4 Centre of Excellence, jehož klíčovými členy jsou české výzkumné organizace. Ačkoliv je reálná energetická aplikace relativně vzdálená, stále se jedná o koncept, který má oproti jiným konceptům reaktorů nezpochybnitelné výhody a širokou škálu aplikovatelnosti. K realizaci prvního energetického

bloku, nebo alespoň jaderného demonstrátoru, musí pokračovat výzkumné a vývojové činnosti v mnoha oblastech zahrnujících například materiálový výzkum, vývoj a kvalifikaci komponent, fyzikální a bezpečnostní analýzy, ale i rozvoj lidských zdrojů. K tomu všemu přispívá provoz zařízení S-Allegro, jemuž je ve článku věnována zvláštní pozornost, stejně tak jako vybraným výsledkům z dosavadního experimentálního provozu. Směřování dalšího vývoje je totiž do jisté míry ovlivněno výsledky experimentů a získanými zkušenostmi z provozu tohoto zařízení.

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

Prezentované výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LM2023041.

LITERATURA

1. The Generation IV International Forum (GIF): Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy System, 2014. https://www.gen-4.org, staženo 8. 11. 2025.
2. Nagatsuka K., Noguchi H., Nagasumi S., Nomoto Y., Shimizu A., Sato H., Nishihara T., Sakaba N.: Nucl. Eng. Des. *425*, 113338 (2024).
3. World Nuclear News: China's demonstration HTR-PM enters commercial operation, https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation, 2023, staženo 5. 10. 2025.
4. V4G4 Centre of Excellence, ALLEGRO Reactor, https://allegroreactor.cz/, staženo 5. 10. 2025.
5. Projekt TREASURE, https://www.projecttreasure.eu/project/about/, staženo 5. 10. 2025.
6. Darrin L., Hangbok C., John B., Alexander D., Oscar G.: *Fast Modular Reactor Nuclear Design Parameters of Fuel Cycle and Power Distributions*, 2022, doi: 10.13182/PHYSOR22-37765.
7. Vácha P.: Jaderná energie *5*, 14 (2024).
8. ÚJV Řež, a.s., HeFASTo Small Modular GFR Reactor, https://www.hefasto.eu/, staženo 5. 10. 2025.
9. Kvizda B., Bebjak S., Mayer G., Vácha P., Melichar T., Ding C.: EPJ Nuclear Sci. Technol. *11*, 25 (2025).
10. Melichar T., Frýbort O., Hájek P., Šefl J., Dočkal K., Radomír F.: Jaderná energie, Speciální číslo/2020, *1* [66], 75 (2020). https://jadernaenergie.online/archiv/special-2020/, staženo 18. 11. 2025.

T. Melichar *(Research Centre Řež, Husinec-Řež, Czech Republic):* **Status of GFR Fast Reactor Technology Development in the Czech Republic and the Experimental Program**

As part of the V4G4 Centre of Excellence, which also has its representation in the Czech Republic, the concept of a gas-cooled fast reactor (GFR) is being developed. The development includes various technological areas in order to achieve a 75 MW demonstrator known as ALLEGRO. This article describes the current state of GFR technology development, with an emphasis on activities taking place in the Czech Republic, including technological advancements, studies of chemical regimes, and material compatibility. One of the most significant activities is the experimental operation of the S-Allegro facility, operated by the Research Centre Řež in the city of Plzeň. It is a scaled-down, electrically heated mock-up of the ALLEGRO reactor with a power output of 1 MW, enabling studies of the system's thermo-hydraulic behavior under both normal and accidental conditions. The article presents the experimental results achieved so far and outlines the connection to further activities in the development of GFR technology.

Keywords: advanced nuclear reactors, gas-cooled fast reactor, GFR, thermal-hydraulic experiments, helium cooling

Acknowledgements

The presented results were obtained using the CICRR infrastructure, which is financially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports – project LM2023041.

The presented work has been realized within Institutional Support by Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.

METROHM Česká republika s.r.o.
ve spolupráci s
Odbornou skupinou analytické chemie
a
Odbornou skupinou elektrochemie
České společnosti chemické
vyhlašuje

15. ročník soutěže
Cena Metrohm 2026

pod záštitou
Prof. Ing. Milana Pospíšila, CSc
rektora VŠCHT Praha
a
Prof. RNDr. Jiřího Zimy, CSc.
nově zvoleného kandidáta na rektora UK

A. Cena Metrohm za nejlepší publikaci mladého chemika (do 35 let).
Uděluje se 5 cen, každá dotovaná částkou 10 000 Kč:
- 3 ceny v oblasti elektroanalytické chemie
- 1 cena v oblasti UV-VIS-NIR spektroskopie a Ramanovy spektrometrie
- 1 cena v oblasti kapalinové chromatografie pro separaci iontových a polárních látek

Soutěžící nechť zašlou pdf-verzi své publikace, vyšlé v roce 2025, e-mailem na adresy barek@natur.cuni.cz a peter.barath@metrohm.cz spolu se svými identifikačními údaji (příjmení, jméno, pracoviště, datum narození, rodné číslo, případně členské číslo České společnosti chemické) do 15. ledna 2026.

B. Cena firmy Metrohm za celoživotní přínos k rozvoji elektroanalytické chemie.
Uděluje se jediná cena, dotovaná částkou 20 000 Kč. Nominační návrh se stručným zdůvodněním v rozsahu cca 2 stránky může zaslat jednotlivec i instituce na emailové adresy barek@natur.cuni.cz a peter.barath@metrohm.cz do 15. ledna 2026.

O udělení ceny bude rozhodovat komise ve složení: Ing. P. Barath, prof. J. Barek, prof. J. Labuda, prof. J. Ludvík, prof. L. Trnková, prof. P. Janoš, prof. P. Matějka. Rozhodnutí této komise je definitivní a nepodléhá žádnému dalšímu schvalování jinými orgány.

Vyhlášení vítězů této soutěže proběhne na slavnostním semináři firmy Metrohm Česká republika na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze 10. února 2026. O dalších podrobnostech budeme průběžně informovat e-mailem a na www stránkách firmy Metrohm (https://www.metrohm.com/cs-cz/), Chemických Listů a České společnosti chemické.

Za Metrohm Česká republika s.r.o.

Ing. **Peter Barath**, Ph.D

Ředitel společnosti

Za Odbornou skupinu analytické chemie České společnosti chemické

prof. RNDr. **Jiří Barek**, CSc.
Vedoucí UNESCO laboratoře elektrochemie životního prostředí
Katedra analytické chemie PřF UK Praha

OBSAH

ÚVODNÍK

Nobelovy ceny jsou rozdány 661
F. Švec

REFERÁTY

Využitie elektrochemických analytických metód pri stanovení liečiva warfarínu 663
V. Žužičová a V. Vyskočil

O hořkém hořci a hořkém hořečku 672
M. Jurášek a P. Drašar

Patnáct let spolupráce Radiochemické laboratoře Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky a 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy 678
J. Kučka, J. Humajová, M. Vetrík, J. Pánek, M. Hrubý, M. Zadinová, P. Francová, L. Šefc a P. Poučková

Jan Amos Komenský a alchymie 683
M. Novák

PŮVODNÍ A METODICKÉ PRÁCE

Recyklace a stabilizace stavebního a demoličního odpadu z jaderných zařízení 689
J. Hadrava a L. Nachmilner

CHEMICKÝ PRŮMYSL

Stav vývoje technologie plynem chlazených rychlých reaktorů v česku a experimentální program 699
T. Melichar

CONTENTS

EDITORIAL

Nobel Prizes Awarded 661
F. Švec

REVIEW ARTICLES

Application of Electrochemical Analytical Methods in the Determination of the Drug Warfarin 663
V. Žužičová and V. Vyskočil

On Bitter Gentian and Bitter Gentianella 672
M. Jurášek and P. Drašar

Fifteen Years of Cooperation between the Radiochemical Laboratory of the Institute of Macromolecular Chemistry of the Academy of Sciences of the Czech Republic and the First Faculty of Medicine of the Charles University 678
J. Kučka, J. Humajová, M. Vetrík, J. Pánek, M. Hrubý, M. Zadinová, P. Francová, L. Šefc, and P. Poučková

Jan Amos Comenius and Alchemy 683
M. Novák

ORIGINAL AND METHODICAL PAPERS

Recycling and Stabilization of Construction and Demolition Wastes from Nuclear Facilities 689
J. Hadrava and L. Nachmilner

CHEMICAL INDUSTRY

Status of Gas-cooled Fast Reactor (GFR) Technology Development in the Czech Republic and the Experimental Program 699
T. Melichar

CHEMICKÉ LISTY • ročník/volume 119 (2025), čís./no. 12 • LISTY CHEMICKÉ, roč./vol. 149, ČASOPIS PRO PRŮMYSL CHEMICKÝ, roč./vol. 135 • ISSN 0009-2770, ISSN 1213-7103 (e-verze) • evidenční číslo MK ČR E 321 • Vydává Česká společnost chemická jako časopis Asociace českých chemických společností ve spolupráci s VŠCHT Praha, s ČSPCH a ÚOCHB AV ČR za finanční podpory Rady vědeckých společností ČR, Akademie věd ČR, Nadace Český literární fond a kolektivních členů ČSCH • IČO 444715 • Published by the Czech Chemical Society • VEDOUCÍ REDAKTOR/EDITOR-IN-CHIEF: V. Vyskočil • REDAKTOŘI/EDITORS: J. Barek, E. Benešová, P. Drašar, P. Holý, P. Chuchvalec, M. Jurášek, Z. Kolská, B. Kratochvíl, J. Masák, J. Podešva, P. Šmejkal; Bulletin: P. Drašar; Webové stránky: R. Liboska, V. Vyskočil • ZAHRANIČNÍ A OBLASTNÍ REDAKTOŘI/FOREIGN AND REGIONAL EDITORS: F. Švec (USA, ČR) • TECHNICKÁ REDAKTORKA/EDITORIAL ASSISTANT: R. Řápková • REDAKČNÍ RADA/ADVISORY BOARD: K. Bláha, L. Červený, E. Dibuszová, L. Grubhoffer, J. Hanika, Z. Havlas, M. Hof, Z. Hostomský, M. Koman, P. Konvalinka, J. Kotek, J. Koubek, J. Málek, P. Matějka, K. Melzoch, V. Pačes, M. Pospíšil, V. Růžička, P. Slavíček, J. Zima, T. Zima • ADRESA PRO ZASÍLÁNÍ PŘÍSPĚVKŮ/MANUSCRIPTS IN CZECH, SLOVAK OR ENGLISH CAN BE SENT TO: Chemické listy, Novotného Lávka 5, 116 68 Praha 1; tel./phone +420 221 082 370, e-mail: chem.listy@csvts.cz • INFORMACE O PŘEDPLATNÉM, OBJEDNÁVKY, PRODEJ JEDNOTLIVÝCH ČÍSEL A INZERCE/INFORMATION ADS: Sekretariát ČSCH, Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1; tel. +420 221 082 383, e-mail: chem.spol@csvts.cz, chem.ekonom@csvts.cz • PLNÁ VERZE NA INTERNETU/FULL VERSION ON URL: http://www.chemicke-listy.cz • TISK: TG TISK s.r.o., 5. května 1010, 563 01 Lanškroun • SAZBA, ZLOM: ČSCH, Chemické listy • Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 • Cena výtisku 180 Kč, roční plné předplatné 2025 (12 čísel) 1810 Kč, individuální členské předplatné pro členy ČSCH 900 Kč. Roční předplatné ve Slovenské republice 96 EUR (doručování via SCHS), individuální členské předplatné pro členy ČSCH 73 EUR (doručování via SCHS), 96 EUR + poštovné (individuální doručování), ceny jsou uvedeny včetně DPH • DISTRIBUTION ABROAD: KUBON & SAGNER, POB 34 01 08, D-80328 Munich, FRG • Pokyny pro autory najdete na http://www.chemicke-listy.cz, zkratky časopisů podle Chemical Abstract Service Source Index (viz http://cassi.cas.org/search.jsp) • Chemické listy obsahující Bulletin jsou zasílány zdarma všem individuálním a kolektivním členům ČSCH a ČSPCH v ČR i zahraničí, do všech relevantních knihoven v ČR a významným představitelům české chemie a chemického průmyslu; v rámci dohod o spolupráci i členům dalších odborných společností • Molekulární námět na obálce (Metachromatická fantazie uvnitř stonku hluchavky. Příčný řez stonkem hluchavky, zvětšeno 200×. Původní barvy jsou upraveny. Podrobnosti k obrázku i preparátu hledejte v článku Angelini J., Benešová E.: Chem. Listy *119*, 117 (2025)): Foto: J. Angelini • Dáno do tisku 27.11.2025.

Obsah ročníku 119 (2025) Volume Contents 119 (2025)

Úvodníky Editorials

P. Holý: Co ukazuje displej osobní váhy ... 1
K. Stejskalová: Kde je brát? Krvinky pro novou krev chemického výzkumu, průmyslu i vzdělávání ... 77
P. Holý: Denní kontakt s rhodiem ... 129
P. Šmejkal: Má české anorganické názvosloví zhynout? ... 169
P. Chuchvalec: Myšlenky jednoho boomera ... 273
B. Kratochvíl, P. Drašar, V. Sýkora a M. Pospíšil: Ztracený základní kámen ... 321
Z. Holík Purkrtová a E. Benešová: Rozumí chemik chemikovi? ... 373
F. Švec: Repetitio mater studiorum aneb opakování matka moudrosti ... 461
J. Podešva: Padesát let pozitronové emisní tomografie ... 501
V. Vyskočil: Kdo hledá, najde ... 553
Z. Kolská a T. Navrátil: A už je zase po… Ohlédnutí za Zjazdom chemikov 2025 na Slovensku ... 617
F. Švec: Nobelovy ceny jsou rozdány ... 661

Referáty Review Articles

J. Rosenkranzová, E. Miliutina, V. Burtsev, O. Lyutakov a V. Švorčík: Plazmonické nanoantény a jejich využití pro zelenou energetiku ... 4
L. Cvak: Výroba polosyntetických antibiotik v Galeně Opava ... 12
P. Mikuška, L. Alexa a H. Cigánková: Nanočástice: Hodnocení toxicity, zdravotní rizika a lékařské aplikace ... 17
P. Lubal: Počátky analytické chemie na PřF MU. Jan Václav Dubský a jeho brněnská analytická škola ... 23
J. Novák a P. Štěpánek: Povídání o mýdle ... 78
Cs. Mišľanová a M. Valachovičová: Expozícia dojčiat mikroplastom ... 87
O. J. Mika: Zničení chemických zbraní dokončeno ... 97
B. Jurásek: Disociativní anestetika: léčebný potenciál *versus* hrozba zneužívání ... 131
B. Koutek, J. Šturala, V. Štejfa, M. Fulem, O. Vítek, J. Macek a K. Růžička: Současný vývoj a výhled použití paliv/aditiv pro vznětové motory s nízkým dopadem na životní prostředí ... 137
M. Novák: Archibald Scott Couper – hvězda, která zhasla příliš brzy ... 148
J. Barek: Význam přeshraniční spolupráce s Univerzitou v Regensburgu pro rozvoj elektroanalytické chemie na PřF UK v Praze ... 155
M. Jurášek a P. Drašar: Ashwagandha, ajurvedický zdroj mládí ... 160
N. Fülöpová, N. Chomová a A. Franc: Možné prínosy farmaceutickej technológie pri príprave fekálneho mikrobiálneho transplantátu ... 171
B. Kratochvíl: Historie Ústavu chemie pevných látek Vysoké školy chemicko-technologické v Praze ... 181
J. Staněk a P. Drašar: Ústav chemie přírodních látek VŠCHT Praha; kořeny a počátkové ... 194
P. Drašar: Počátkové chemie terpenů v českých zemích ... 202
L. Tenora: Renezance 6-diazo-5-oxo-l-norleucinu (DON): Strategie proléčiv jako možná cesta k novému protinádorovému léčivu ... 274
S. Rádl: A ještě jeden příběh navíc ... 287
L. Alexa, P. Karásek, J. Kratzer, J. Křivánková, Pavel Kubáň, Petr Kubáň, P. Mikuška, S. Musil, A. Týčová, J. Weisová a M. Roth: Historie a současnost Ústavu analytické chemie Akademie věd České republiky ... 294
K. Kliková, J. Trejbal a H. Stiborová: Mechanismy mikrobiálně indukovaného srážení uhličitanu vápenatého ... 323
L. Loufková a O. J. Mika: Chemické zbraně – přetrvávající potenciální hrozba ... 335
T. Lener a K. Nesměrák: Pověstmi opředené jmelí bílé (*Viscum album* L.): Historie jeho využívání v léčbě a látky v něm obsažené ... 374
M. Šulc a P. Janoš: Technologie pro získávání lithia z minerálu cinvaldit – historie, současnost a budoucnost ... 385
Z. Kramplová, J. Blaškovičová a A. Purdešová: Využitie uhlíkových voltampérometrických senzorov na stanovenie pesticídov vo vodách ... 394

L. Cvak: Výroba kardenolidů v Galeně Opava 463
H. Ottová, J. Trejbal a H. Stiborová: Využití mikrobiálně indukovaného srážení uhličitanu vápenatého v biotechnologiích 468
M. Raab a M. Dunajová: Pamětní síň izotaktického polypropylenu 476
M. Jurášek a P. Drašar: Léčivá síla darů mágů 502
V. Lipšová, B. Kotlík, S. Zacharov, K. Mrázová a T. Navrátil: Je třeba obávat se azbestu? 512
M. Jurášek, L. Opletal a P. Drašar: Císařský květ podzimního slunce plný léčivé síly 554
J. Sochor a V. Sýkora: Historie stanovení celkové tvrdosti vody v Československu 560
A. Horynová, V. Hájková, L. Vyšín a L. Juha: Chemické aspekty kontaminace EUV/rtg. optických prvků uhlíkem 570
E. Benešová a B. Kratochvíl: Novinky v oblasti konjugátů protilátka-léčivo 579
J. Čopíková, Z. Bubník a P. Drašar: Počátkové cukrovarnictví v Čechách, výuky jeho, jakož i chemie sacharidů na pražské polytechnice a později VŠCHT Praha 588
M. Jurášek a P. Drašar: O tom, jak kvítí svatého Jana zahání noční obludy i zlé duchy a člověku prospívá i škodí 619
A. Franc a L. Taras: Veterinární lizy z pohledu farmaceutické technologie 625
T. Hašek: Podpora růstu a ochrana rostlin pomocí endofytních mikroorganismů izolovaných z nadzemních částí rostlin 633
J. Šoukal: První absolventi technické chemie na pražské technice z let 1880–1900 a jejich uplatnění v praxi 638
V. Žužičová a V. Vyskočil: Využitie elektrochemických analytických metód pri stanovení liečiva warfarínu 663
M. Jurášek a P. Drašar: O hořkém hořci a hořkém hořečku 672
J. Kučka, J. Humajová, M. Vetrík, J. Pánek, M. Hrubý, M. Zadinová, P. Francová, L. Šefc a P. Poučková: Patnáct let spolupráce Radiochemické laboratoře Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky a 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy 678
M. Novák: Jan Amos Komenský a alchymie 683

Původní a metodické práce **Original and Methodical Papers**

M. Mellová, K. Dunovská, A. Vícha, J. Čepová, R. Kizek, R. Průša a E. Klapková: Stanovení volného 3-methoxytyraminu pomocí LC-MS/MS u dětí s neuroblastomem 35
V. Janda, M. Šváb a O. Šráček: (Re)mineralizace pitné vody kalcitem nebo dolomitem 105
Z. Malinovská, L. Jendrálová, E. Čonková, P. Váczi a M. Čižmáriková: Využitie antimykotík vo farmakoterapii onychomykóz a pridružených dermatomykóz 109
L. Yanush, V. Buravets, E. Miliutina, J. Rosenkranzová, K. Kukralová, K. Severa, F. Hošek, V. Burtsev, D. Zabelin, M. Urbanová, Z. Kolská, V. Švorčík a O. Lyutakov: Enantioselektivní analýza organických molekul s použitím chirálních nanomateriálů 303
N. Ciobanu, E. Gorincioi, N. Sucman, V. Valica, L. Uncu a F. Z. Macaev: Nový pohled na udržitelnou syntézu (±)-monastrolu: využití biginelliho vícesložkové reakce s nízkomethoxylovaným pektinem jako katalyzátorem 340
M. Havlová, R. Šefců, V. Antušková, M. Kotrlý, I. Turková, Ž. Dohnalová, J. Luxová a P. Šulcová: Optimalizace extrakčních metod pro analýzu červených syntetických pigmentů použitých na uměleckých dílech pomocí vysokoúčinné kapalinové chromatografie 481
V. Rippelová a L. McGachy: Odhad sorpčního koeficientu na základě obsahu organického uhlíku a půdní textury 526
I. Hůnová a H. Škáchová: Chemické složení atmosférických srážek je indikátorem výrazných změn v našem ovzduší 533
M. O. Fusek, J. Werle, O. Mitrovský, B. Hosnedlová, J. Čepová, K. Kotaška, R. Průša, E. Klapková a R. Kizek: Elektrochemické studium hladiny iontů kovů v moči u pacientů se zhoubným nádorem prostaty 645
J. Hadrava a L. Nachmilner: Recyklace a stabilizace stavebního a demoličního odpadu z jaderných zařízení 689

Chemický průmysl **Chemical Industry**

P. Drašar a Z. Bělohlav: Časopisy české chemické obce inženýrské 43
R. Staněk a J. Zábranská: Odpadní vody z průmyslové výroby nitrocelulózy a možnost jejich biologického zpracování 311
M. Šilhan, P. Polívka, L. Špička a B. Vahalík: Očekávaný rozvoj vodíkové infrastruktury pro dopravní sektor, využití malých modulárních jaderných reaktorů 345
T. Melichar: Stav vývoje technologie plynem chlazených rychlých reaktorů v česku a experimentální program 699

Výuka chemie **Education in Chemistry**

J. Angelini a E. Benešová: Mikroskopie jednoduchých preparátů a odborný nákres jako unikátní nástroj harmonického rozvoje studentů v laboratorní výuce 117
T. Feltl, P. Šmejkal, J. Veselý a M. Locker: MoleGraph: Pomůcka pro rozvoj přírodovědných a digitálních kompetencí ve školní výuce 208
M. Blaško, S. Janoušková a E. Stratilová Urválková: O postavení chemie ve vybraných integrovaných přírodovědných kurikulech v zahraničí jako inspirace pro české nižší sekundární vzdělávání 351
T. Feltl a P. Šmejkal: MoleGraph: DIY čidla pro školní experimenty a jejich srovnání s komerčními variantami 357
V. Horálek a P. Distler: Učební úlohy na téma jaderná chemie a f-prvky zaměřené na rozvoj kritického myšlení žáků 489
K. Trčková: Tajemství mistra Cupruma: Úniková hra jako nástroj pro výuku chemie 541

Bulletin Asociace českých chemických společností

A. Mittnerová: Podpora genderové rovnováhy na VŠCHT Praha prostřednictvím ocenění přínosů žen v soutěži o Cenu Julie Hamáčkové 53
M. Šilhan: Vznik mezinárodní SSbD (Safe-and-Sustainable-by-Design) komunity 56
P. Drašar a V. Pačes: Ke 45 letům od úmrtí Františka Šorma a k jeho krátkému působení na Fakultě chemické ČVUT v Praze 219
J. Zima: Katedra analytické chemie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy si na Ceně Metrohm 2025 připomněla 100 let od svého založení 225
J. Barek: 1. mezinárodní konference doktorandů o pokrocích v chemii na VŠCHT Praha 227
L. Kavan: Tři vysoká akademická ocenění pro prof. Michaela Grätzela 233
J. Sochor a V. Sýkora: Mol – jednotka, kterou všichni musí mít. Nebo ne? Aneb přežije jednotka mol rok 3000? 238
V. Dvořáčková a O. Tikovský: Hledání základního kamene Českého vysokého učení technického i urbanistické vize dejvického kampusu 409
J. Čársky, P. Drašar a V. Milata: Korene združovania chemikov (prírodovedcov) v dnešnom Slovensku a funkcionári Československej spoločnosti chemickej zo Slovenska 421
P. Drašar a V. Milata: K vývoji organizace slovenských chemiků za první republiky 429
J. Barek: 7. přeshraniční seminář organizovaný Univerzitou Karlovou a Univerzitou v Regensburgu, Hojsova Stráž, 15. – 17. dubna 2025 434
M. Tomaniová a E. Ryšlavá: EIT Food hub v Česku: Inovace, vzdělávání a podpora udržitelného potravinového systému 599

Ze života chemických společností 59, 240, 440, 604
Odborná setkání 62, 246, 440, 604
Akce v ČR a v zahraničí 66, 252, 448, 608
Recenze 252, 607
Členská oznámení a služby 66, 446
Zprávy 67, 254, 448, 608
Chemik na cestách 260
Osobní zprávy 71, 262, 455, 611
Výročí a jubilea 72, 264, 456, 613

Czech Chemical Society Symposium Series
Ročník 23

1. Cena Karla Štulíka, Praha, 29. 1. 2025 1
2. XXIVth Interdisciplinary Meeting of Young Life Scientists, Milovy, 18. 5. – 21. 5. 2025 21
3. International Conference on Immunoanalysis, Lubochňa, 9. 6. – 13. 6. 2025 73
4. NIVB Meeting 2025, Kutná Hora, 4. 11. – 7. 11. 2025 83

Autorský rejstřík 119 (2025) Author Index 119 (2025)

(úv) úvodník, (ref) přehledný referát, (pmp) původní a metodické práce, (nt) nomenklatura a terminologie, (ch.p.) chemický průmysl, (rec) recenze, (os.zp.) osobní zprávy, (s) odborná setkání, (v.ch.) výuka chemie, (d) diskuse, (z) zprávy, (b) bulletin

Alexa L.: (ref) 17, 294
Angelini J.: (v.ch.) 117
Antušková V.: (pmp) 481

Barek J.: (b) 227, 434, (ref) 155, (s) 63, 246, 248, 605, (z) 448
Bělohlav Z.: (ch.p.) 43
Beneš P.: (os.zp.) 71
Benešová E.: (rec) 252, 607, (ref) 579, (s) 442, (úv) 373, (v.ch.) 117, (z) 455
Blaško M.: (v.ch.) 351
Blaškovičová J.: (ref) 394
Bleha R.: (s) 62
Bubník Z.: (ref) 588
Buravets V.: (pmp) 303
Burtsev V.: (pmp) 303, (ref) 4

Cibulka R.: (b) 60, (os.zp.) 72
Cigánková H.: (ref) 17
Ciobanu N.: (pmp) 340
Cvak L.: (ref) 12, 463

Čársky J.: (b) 421
Čepová J.: (pmp) 35, 645
Čižmáriková M.: (pmp) 109
Čonková E.: (pmp) 109
Čopíková J.: (ref) 588, (s) 62

Distler P.: (v.ch.) 489
Dohnalová Ž.: (pmp) 481
Drahonský J.: (z) 260
Drašar P.: (b) 219, 260, 421, 429, (ch.p.) 43, (ref) 160, 194, 202, 502, 554, 588, 619, 672, (úv) 321, (z) 453, 608
Dunajová M.: (ref) 476
Dunovská K.: (pmp) 35
Dušek M.: (os.zp.) 263
Dvořáčková V.: (b) 409

Fábry J.: (os.zp.) 263
Feltl T.: (v.ch.) 208, 357
Franc A.: (ref) 171, 625
Francová P.: (ref) 678
Fulem M.: (ref) 137
Fülöpová N.: (ref) 171
Fusek M. O.: (pmp) 645

Gorincioi E.: (pmp) 340

Hadrava J.: (pmp) 689
Hájková V.: (ref) 570
Hašek T.: (ref) 633
Havlová M.: (pmp) 481
Holeyšovský J.: (os.zp.) 455
Holík Purkrtová Z.: (úv) 373
Holý P.: (úv) 1, 129
Horálek V.: (v.ch.) 489
Horynová A.: (ref) 570
Hosnedlová B.: (pmp) 645
Hošek F.: (pmp) 303
Hromadová M.: (s) 65
Hrubý M.: (ref) 678
Humajová J.: (ref) 678
Hůnová I.: (pmp) 533

Chomová N.: (ref) 171
Chuchvalec P.: (rec) 253, (úv) 273

Janda V.: (pmp) 105
Janoš P.: (ref) 385
Janoušková S.: (v.ch.) 351
Jendrálová L.: (pmp) 109
John J.: (b) 604, (os.zp.) 456
Juha L.: (ref) 570
Jurásek B.: (ref) 131
Jurášek M.: (ref) 160, 502, 554, 619, 672

Karásek P.: (ref) 294
Kavan L.: (b) 233
Kizek R.: (pmp) 35, 645, (s) 442, 444, (z) 69
Klánová J.: (os.zp.) 263
Klapková E.: (pmp) 35, 645

Kliková K.: (ref) 323
Kolář K.: (os.zp.) 71
Kolská Z.: (pmp) 303, (úv) 617
Košťálová B.: (s) 62
Kotaška K.: (pmp) 645
Kotlík B.: (ref) 512
Kotrlý M.: (pmp) 481
Koutek B.: (ref) 137
Kramplová Z.: (ref) 394
Kratochvíl B.: (ref) 181, 579, (úv) 321
Kratochvíla J.: (z) 69
Kratzer J.: (ref) 294
Křivánková J.: (ref) 294
Kubáň Pavel: (ref) 294
Kubáň Petr: (ref) 294
Kučka J.: (ref) 678
Kukralová K.: (pmp) 303

Lederer J.: (s) 440
Lener T.: (ref) 374
Lipšová V.: (ref) 512
Locker M.: (v.ch.) 208
Loufková L.: (ref) 335
Lubal P.: (ref) 23
Lubojacký J.: (s) 440
Luxová J.: (pmp) 481
Lyutakov O.: (pmp) 303, (ref) 4

Macaev F. Z.: (pmp) 340
Macek J.: (ref) 137
Macháčková M.: (s) 445
Malinovská Z.: (pmp) 109
Marková M.: (z) 70
McGachy L.: (pmp) 526
Melichar T.: (ch.p.) 699
Mellová M.: (pmp) 35
Mika O. J.: (rec) 253, (ref) 97, 335
Mikuška P.: (ref) 17, 294
Milata V.: (b) 421, 429
Miliutina E.: (pmp) 303, (ref) 4
Mišľanová Cs.: (ref) 87
Mitrovský O.: (pmp) 645
Mittnerová A.: (b) 53, (z) 449

Mošner P.: (os.zp.) 611
Mrázová K.: (ref) 512
Musil S.: (ref) 294

Nachmilner L.: (pmp) 689
Navrátil T.: (b) 604, (ref) 512, (s) 445, (úv) 617
Němec P.: (os.zp.) 611
Nesměrák K.: (ref) 374, (s) 606
Novák J.: (ref) 78
Novák M.: (ref) 148, 683

Opletal L.: (ref) 554
Ottová H.: (ref) 468

Pačes V.: (b) 219
Pánek J.: (ref) 678
Plzák Z.: (z) 70
Podešva J.: (úv) 501
Polívka P.: (ch.p.) 345
Pospíšil M.: (úv) 321
Poučková P.: (ref) 678
Průša R.: (pmp) 35, 645
Purdešová A.: (ref) 394

Raab M.: (ref) 476
Rádl S.: (ref) 287
Rippelová V.: (pmp) 526
Rosenkranzová J.: (pmp) 303, (ref) 4
Roth M.: (ref) 294
Ruml T.: (os.zp.) 612
Růžička K.: (ref) 137
Ryšlavá E.: (b) 599

Severa K.: (pmp) 303
Sochor J.: (b) 238, (ref) 560
Sokolová R.: (s) 65
Srsenová L.: (s) 445
Staněk J.: (ref) 194
Staněk R.: (ch.p.) 311
Stejskalová K.: (úv) 77
Stiborová H.: (ref) 323, 468
Stratilová Urválková E.: (v.ch.) 351
Sucman N.: (pmp) 340
Svoboda J.: (os.zp.) 72

Sýkora V.: (b) 238, (ref) 560, (úv) 321

Šárka E.: (s) 62
Šefc L.: (ref) 678
Šefců R.: (pmp) 481
Šilhan M.: (b) 56, (ch.p.) 345
Škáchová H.: (pmp) 533
Šmejkal P.: (úv) 169, (v.ch.) 208, 357, (z) 256
Šoukal J.: (ref) 638
Špička L.: (ch.p.) 345
Šráček O.: (pmp) 105
Štejfa V.: (ref) 137
Štěpánek P.: (ref) 78
Šturala J.: (ref) 137
Šulc M.: (ref) 385
Šulcová P.: (b) 61, (pmp) 481, (s) 604
Šváb M.: (pmp) 105
Švec F.: (úv) 461, 661
Švorčík V.: (pmp) 303, (ref) 4

Taras L.: (ref) 625
Tenora L.: (ref) 274
Teplý P.: (z) 256
Tikovský O.: (b) 409
Tomaniová M.: (b) 599
Trčková K.: (v.ch.) 541
Trejbal J.: (ref) 323, 468
Tříska J.: (os.zp.) 263
Turková I.: (pmp) 481
Týčová A.: (ref) 294, (z) 254

Uncu L.: (pmp) 340
Urbanová M.: (pmp) 303

Váczi P.: (pmp) 109
Vahalík B.: (ch.p.) 345
Valachovičová M.: (ref) 87
Valica V.: (pmp) 340
Veselý J.: (v.ch.) 208
Vetrík M.: (ref) 678
Vidovencová Z.: (b) 260, (z) 453
Vícha A.: (pmp) 35
Vítek O.: (ref) 137
Vlček J.: (os.zp.) 262
Vyskočil V.: (ref) 663, (úv) 553
Vyšín L.: (ref) 570

Weisová J.: (ref) 294
Werle J.: (pmp) 645

Yanush L.: (pmp) 303

Zabelin D.: (pmp) 303
Zábranská J.: (ch.p.) 311
Zadinová M.: (ref) 678
Zacharov S.: (ref) 512
Zima J.: (b) 225

Žužičová V.: (ref) 663

ČESKÁ SPOLEČNOST CHEMICKÁ

vydává

CHEMICKÉ LISTY

CHLSAC *119*, 1 – 708 (2025)

Vedoucí redaktor *Editor-in-Chief*

V. Vyskočil

Redakční kruh *Editorial Board*

J. Barek, E. Benešová, P. Drašar, P. Holý, P. Chuchvalec, M. Jurášek, Z. Kolská, B. Kratochvíl, J. Masák, J. Podešva, P. Šmejkal

Zahraniční a oblastní redaktoři *Foreign and Regional Editors*

F. Švec (USA, ČR)

Redakční rada *Advisory Board*

K. Bláha, L. Červený, E. Dibuszová, L. Grubhoffer, J. Hanika, Z. Havlas, M. Hof, Z. Hostomský, M. Koman, P. Konvalinka, J. Kotek, J. Koubek, J. Málek, P. Matějka, K. Melzoch, V. Pačes, M. Pospíšil, V. Růžička, P. Slavíček, I. Stibor, J. Zima, T. Zima

Technická redaktorka *Editorial Assistant*

R. Řápková

Ročník 119 (2025) Volume 119 (2025)

Listy chemické, ročník 149 – Časopis pro průmysl chemický, ročník 135

Str. 1 – 708

ISSN 0009-2770

ORLEN Unipetrol NADACE

V ČÍSLECH ZA ROK **2025**

3 004 100 Kč
Školní grantový program

- 19 základních škol
- 18 středních škol
- 2 vysoké školy

700 000 Kč
Stipendijní grantový program

- 17 studentů ze SŠ
- 25 studentů z VŠ

400 000 Kč
Pedagogický grantový program

- 14 pedagogů ze SŠ
- 13 pedagogů ze ZŠ

Grant pro jednotky dobrovolných hasičů

20 jednotek
Podpora v hodnotě **1 000 000 Kč**

Další aktivity

Odchováno **12** sokolích mláďat na komínech

Předáno **44** Plastíkových kufříků

Natočeno **9** přednášek Pátky s vědou

Vypuštěno **2 100 kg** ryb do řek Labe a Bílina

Realizovaných **70** dobrovolnických projektů

ICCT

INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL TECHNOLOGY

13. mezinárodní chemicko-technologická konference

13th International Conference on Chemical Technology

13.–15. dubna 2026
Mikulov, Czech Republic

ULOŽTE SI TERMÍN

Registrace, formulář k zaslání abstrakt a další informace od října 2025 na **www.icct.cz**.

ČSPCH ČESKÁ SPOLEČNOST PRŮMYSLOVÉ CHEMIE

SCHP ČR

ÚSTAV CHEMICKÝCH PROCESŮ AV ČR INSTITUTE OF CHEMICAL PROCESS FUNDAMENTALS OF THE ASCR

Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická

STU FCHPT

ORLEN Unipetrol

VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE

FCH

Chemistry Europe

European Chemical Societies Publishing

Chemistry Europe

- **16** chemických společností
- z **15** zemí Evropy
- které spoluvlastní **21** vědeckých časopisů
- ze kterých si čtenáři stáhli v roce 2024 přes **22,9** milionů článků
- od roku 1995 bylo publikováno v rámci CE přes **140 000** článků
- Chemistry Europe vyznamenalo **150** vědců titulem Fellow a **8** titulem Honorary Fellow za jejich vynikající výsledky v chemických oborech

www.chemistry-europe.org

Analysis & Sensing

Analytical Science Advances

Batteries & Supercaps

ChemBioChem

ChemCatChem

ChemElectroChem

ChemFoodChem

ChemistryEurope

Chemistry - A European Journal

Chemistry - Methods

ChemistryOpen

ChemistrySelect

ChemMedChem

ChemPhotoChem

ChemPhysChem

ChemPlusChem

ChemSusChem

ChemSystemsChem

Electrochemical Science Advances

European Journal of Inorganic Chemistry

European Journal of Organic Chemistry

Open Access

Chemistry Europe
European Chemical Societies Publishing

publikováno v partnerství s

WILEY VCH

Sigma-Aldrich®
Lab & Production Materials

MERCK

SYNTHIA® Retrosynthesis Software

Discovery at Your Fingertips

Retrosynthesis for Every Lab - SYNTHIA® Lab

Expert-coded by chemists and engineered by computer scientists, SYNTHIA® allows scientists to quickly discover novel pathways for new and published target molecules.

50% off

LIMITED TIME ONLY

Available for small academic groups and non-profit labs.

12 Months Deal

Only **37 750 CZK**

(normally 75 000 CZK)

Offer Highlights

- Unlimited number of molecules to run
- Up to 10 full users, no installation
- Automatic Retrosynthesis, Step-by-step Analysis, Similarity Search

www.digitalchemistry.ai

The Life Science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as Millipore Sigma in the US and Canada.