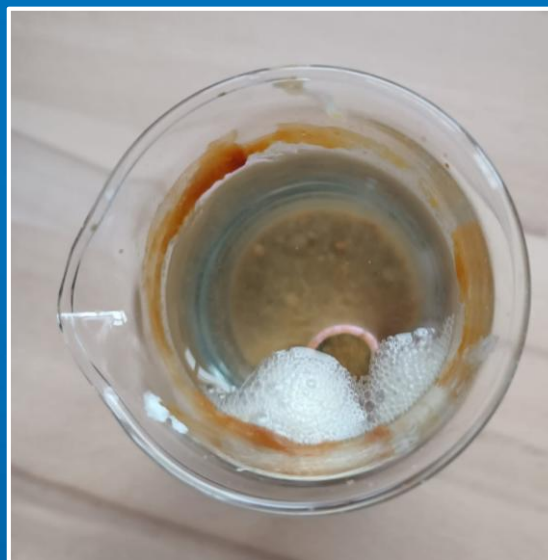


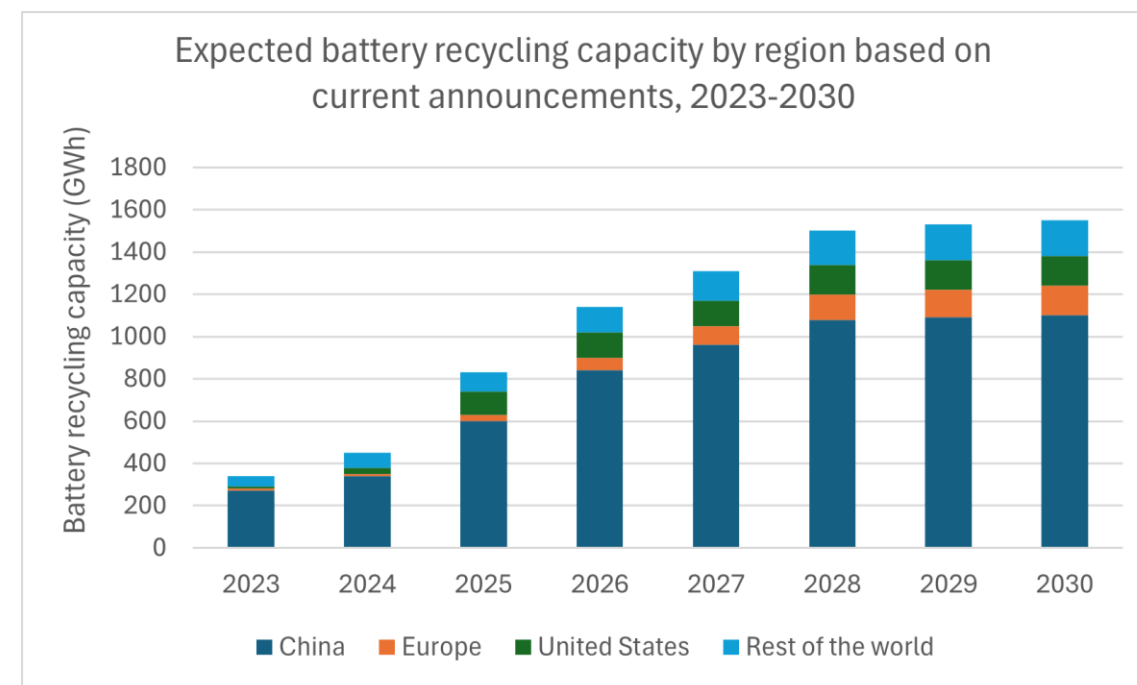


RECYKLAČNÍ PŘEDPŘÍPRAVA LITHIUM-IONTOVÝCH BATERIÍ – NOVÉ PŘÍSTUPY A UDRŽITELNÁ ŘEŠENÍ

Ing. ANNA PRAŽANOVÁ, Ph.D., Ing. Zbyněk Plachý, MSc. Václav Knap, Ph.D.

TREND LITHIUM-IONTOVÝCH BATERÍ

- Hlavní zdroje energie pro elektromobily, stacionární úložiště a spotřební elektroniku.
- Exponenciálně rostoucí produkce → 2035.
- Změny v chemickém složení, preference materiálů s nižším obsahem kobaltu (LCO → NMC/NCA → LFP).
- Různorodost oblastí aplikace a konstrukčních řešení baterií.
- Zvyšující se objem vyřazených článků vytváří tlak na efektivní a bezpečné odpadní zpracování.



IEA. Licence: CC BY 4.0.

Recycling capacity refers to material recovery. A maximum utilisation factor of 85% and an average cell energy density of 180 Wh/kg are assumed.

LIKVIDACE LITHIUM-IONTOVÝCH BATERIÍ

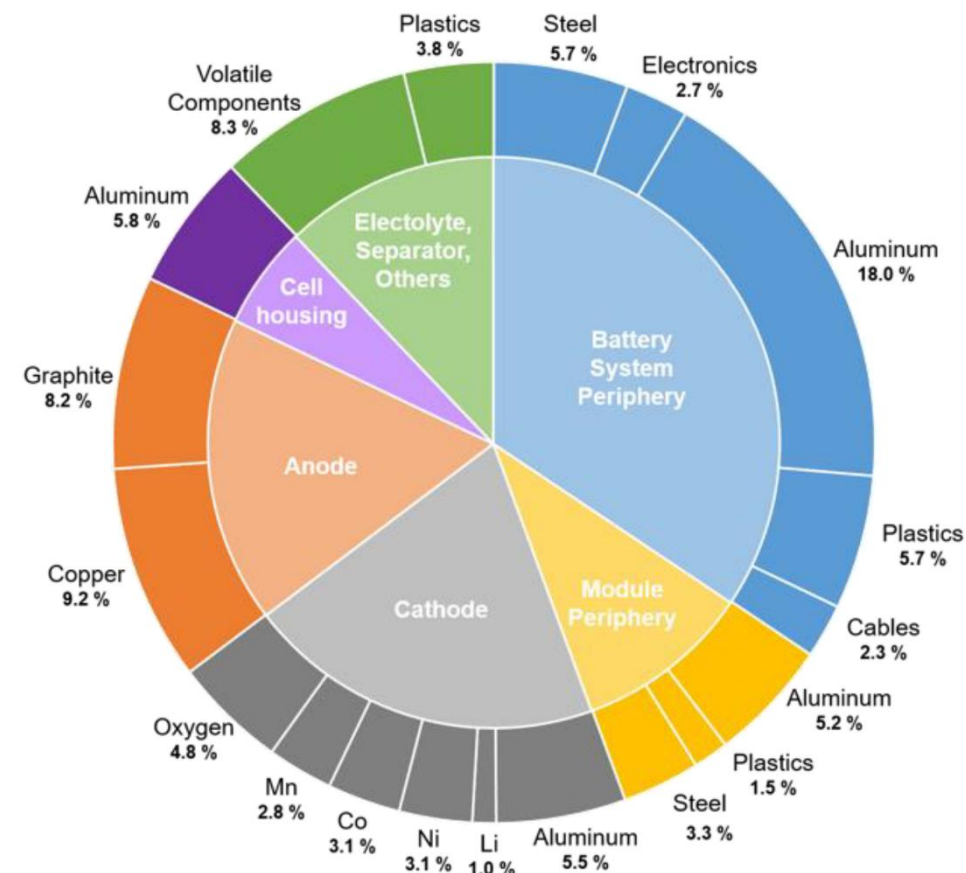
- Rizika nesprávného nakládání: vyřazené baterie představují nebezpečný odpad.
 - Environmentální hrozby: únik toxických látek, hrozí kontaminace půdy a spodních vod těžkými kovy a nebezpečnými chemikáliemi z elektrolytu.
 - Požáry: baterie obsahují zbytkovou energii a mohou se snadno vznítit nebo explodovat.
- Regulační rámec:
 - platná legislativa, zejména nové Nařízení EU o bateriích (EU 2023/1542), stanovuje ambiciózní cíle pro účinnost recyklace a míru zpětného získání klíčových materiálů.



© 2025 Copyright Volkswagen US Media Site.

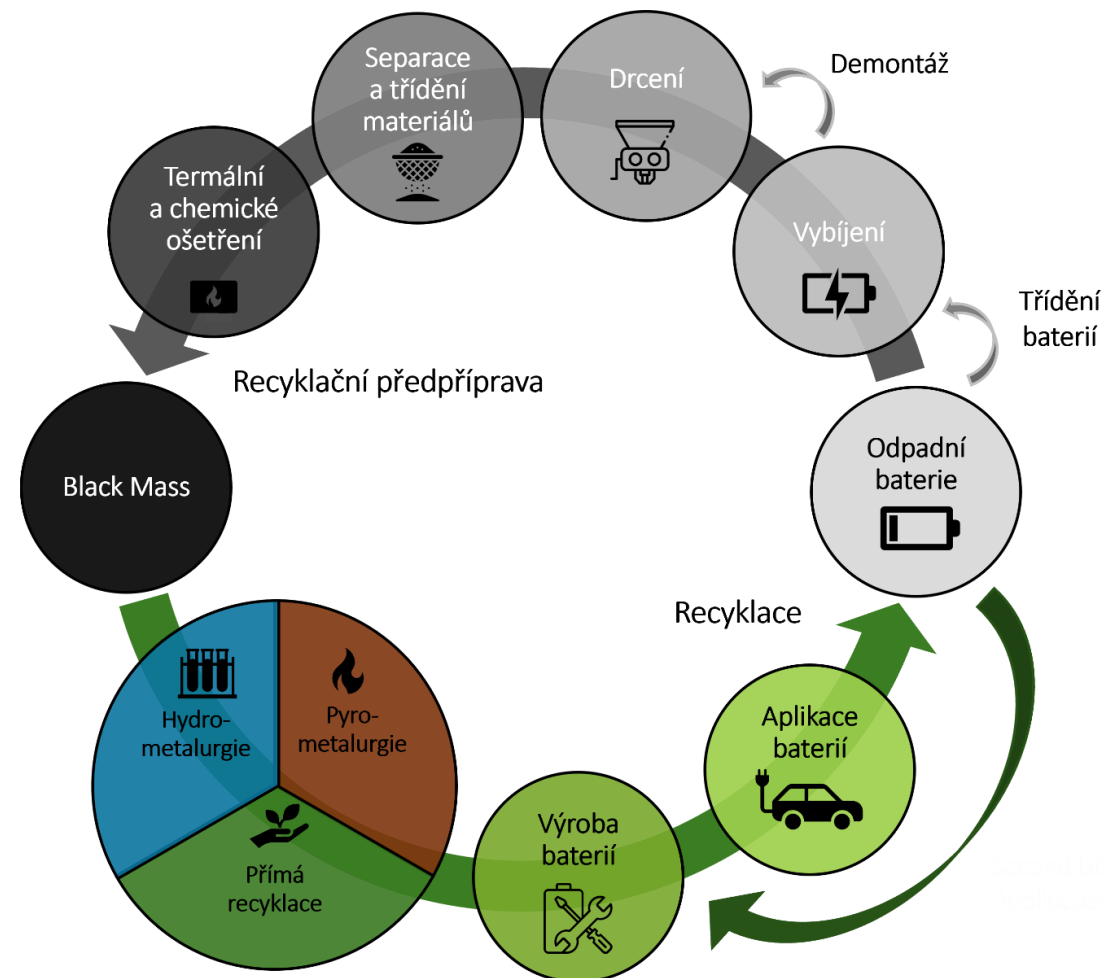
RECYKLACE LITHIUM-IONTOVÝCH BATERIÍ

- **Ztráta cenných surovin:** lithium-iontové baterie obsahují vzácné a strategicky významné kovy, například kobalt, nikl, mangan či lithium, jejichž těžba je energeticky i environmentálně náročná.
- **Strategická surovinová bezpečnost:**
 - zpětné získávání cenných a kritických surovin
→ snížení závislosti na primární, často nestabilní a environmentálně náročné těžbě.
- **Udržitelnost a cirkulární ekonomika:**
 - předpoklad pro uzavření materiálové smyčky.



Generic composition of an NMC battery system divided into individual components. Reproduced from Gerold, E. et al. Critical Evaluation of the Potential of Organic Acids for the Environmentally Friendly Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries, doi: 10.3390/recycling7010004.
© 2022 by the authors. Licensed under CC BY.

- Soubor úvodních operací zajišťujících bezpečné a efektivní zpracování baterií.
- **Cíl:** příprava materiálů pro následné kroky recyklace.
- **Produkt:** černá hmota (*Black Mass*) jemný práškový koncentrát aktivních materiálů z elektrod.
- Navazující zpracování černé hmoty:
 - pyrometalurgie: vysokoteplotní zpracování,
 - hydrometalurgie: chemické loužení a extrakce kovových iontů,
 - přímá recyklace: obnova elektrodových materiálů bez rozkladu na prvky.



- Podstata vybíjení:
 - odstranění zbytkové energie z článků je klíčové pro bezpečné provedení následného drcení a pro minimalizaci rizika požáru.
- Rozdělení vybíjecích přístupů:
 - velké bateriové systémy (packety, moduly):
 - aktivní vybíjení,
 - články spotřební elektroniky (mobilní telefony, notebooky, vrtačky...):
 - elektrochemické vybíjení – vybíjení ve vodivých, nejčastěji solných, roztocích.

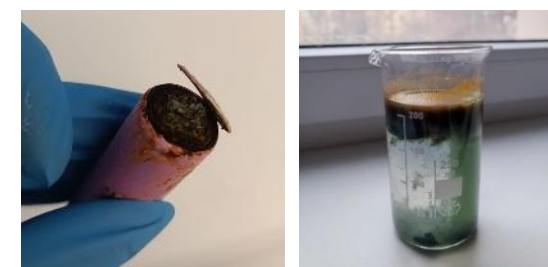


© 2025 Copyright Volkswagen US Media Site.

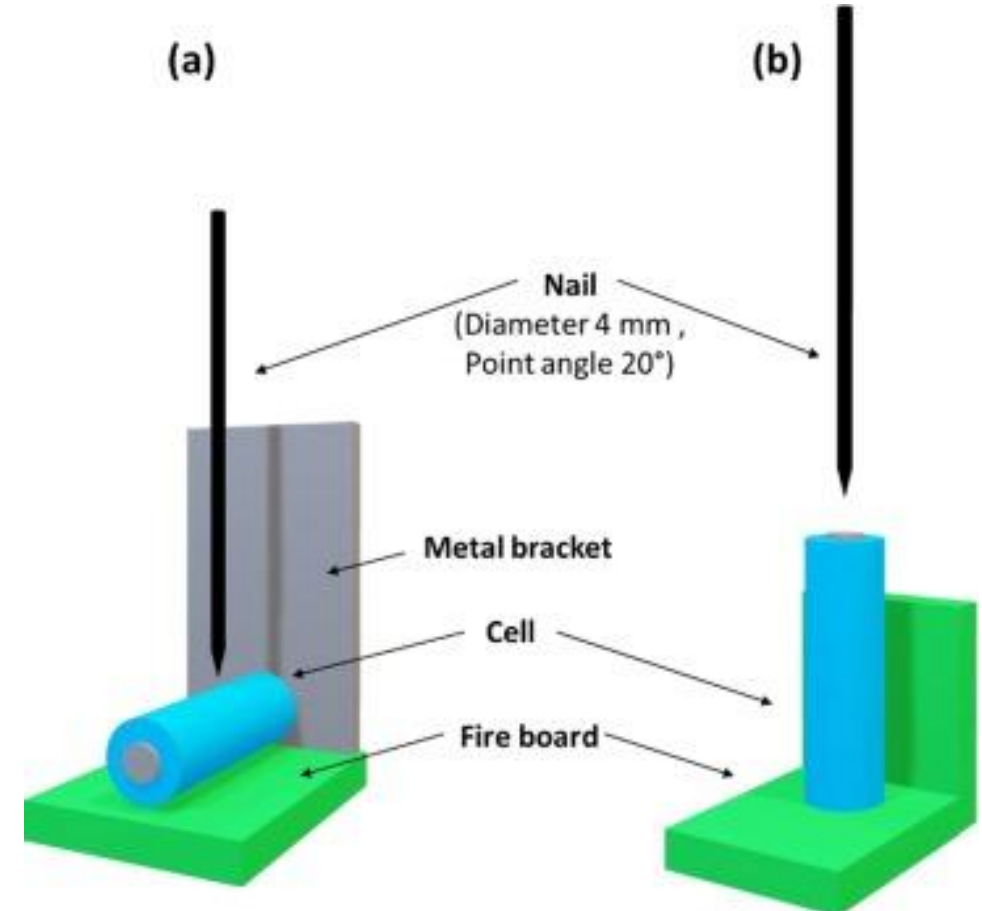


PROBLÉM: ELEKTROCHEMICKÉ VYBÍJENÍ

- Výhody:
 - efektivita a nízké náklady: zavedená a relativně levná technologie vhodná pro hromadné zpracování baterií,
 - jednoduchost procesu: snadná průmyslová implementace.
- Nevýhody:
 - fyzické poškození článků: solný roztok způsobuje silnou korozi, která nevratně narušuje obal i elektrodové kontakty článků,
 - kontaminace vybíjecí lázně: narušením obalu dochází k úniku elektrolytu a cenných kovů do vybíjecího roztoku,
 - environmentální a ekonomické dopady: vznik nebezpečného odpadu – kontaminované vody, jejíž čištění je technologicky i finančně velmi náročné. Únikem cenných kovů do lázně se přímo snižuje výtěžnost a ziskovost celého procesu.

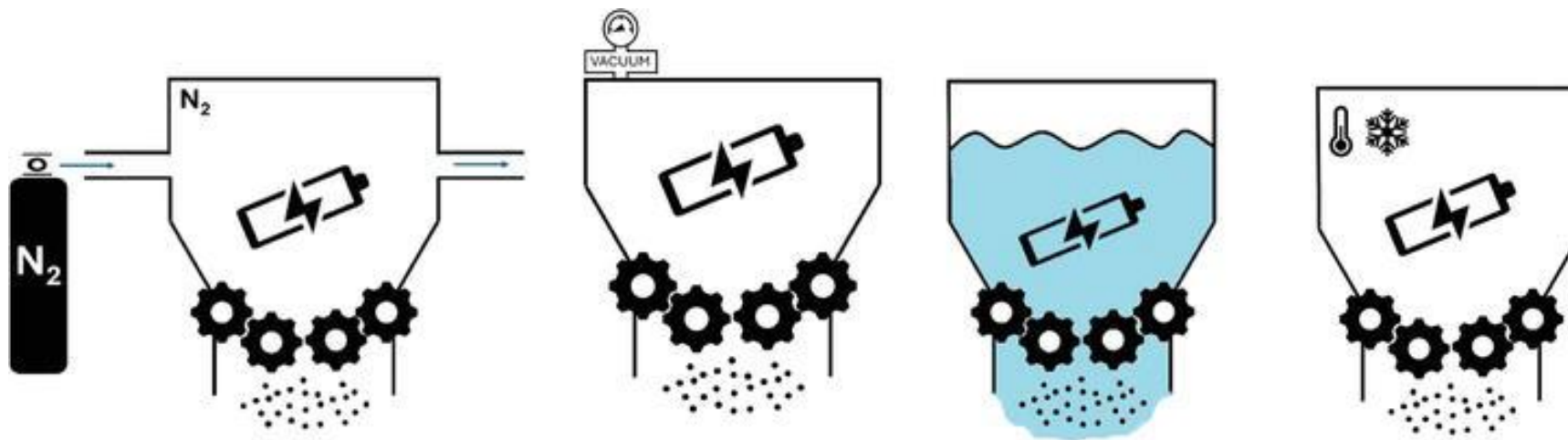


- **Mechanické metody** (propíchnutí, drcení pod ochrannou atmosférou).
 - Výhody: rychlost procesu, možnost spojení vybití a drcení do jednoho kroku.
 - Nevýhody: Rizikovost – hrozí nekontrolované uvolnění energie, požár, exploze a únik toxických plynů. Vyžaduje velmi nákladné bezpečnostní vybavení.



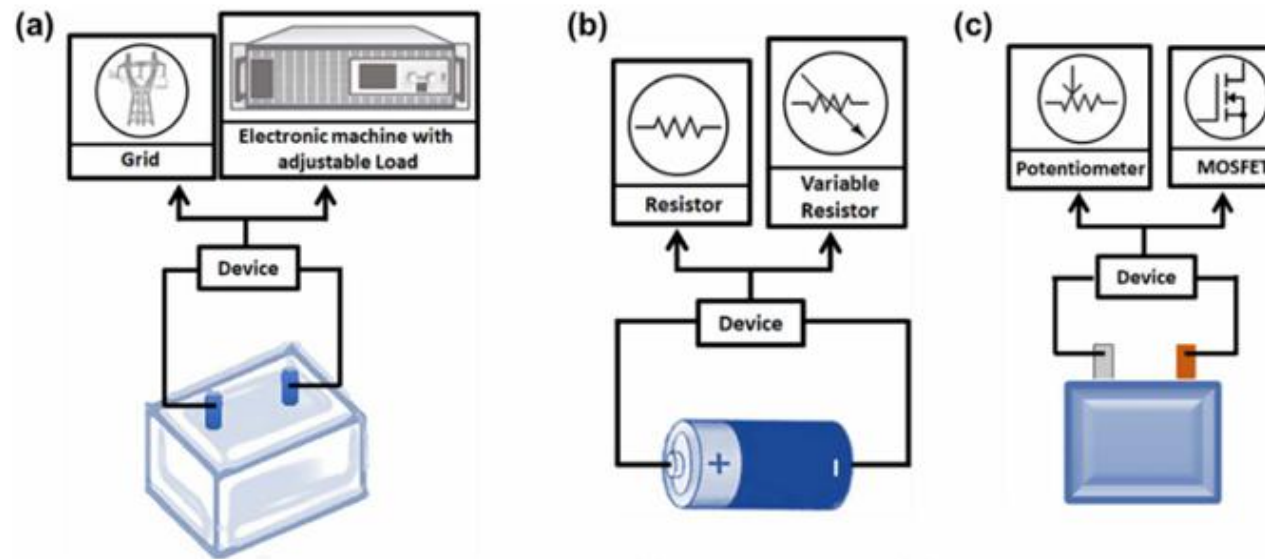
Set-up of the nail penetration tests for 21700 NMC lithium-ion battery: (a) axial penetration and (b) radial penetration. Reproduced from Shelke, A.V.; Buston et al. Characterizing and predicting 21700 NMC lithium-ion battery thermal runaway induced by nail penetration. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2022. Licensed under CC BY 4.0.

- Kryogenní zpracování (např. mražení v kapalném dusíku).
 - Výhody: Zvýšení bezpečnosti následného drcení, eliminace rizika tepelného úniku.
 - Nevýhody: Nejedná se přímo o vybití, ale o snížení reaktivity zmrazením elektrolytu. Lze označit spíše za bezpečnostní (energeticky a ekonomicky náročnou) předúpravu.



Different technologies to shred a lithium-ion battery: (a) Inert, (b) Vacuum, (c) Wet, and (d) Cryogenic. Reproduced from Oliveira, M.; Abreu, B.; Costa, H. Shredding of Lithium-Ion Batteries: Overview and Industrial Perspective. IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1008229. Licensed under CC BY 4.0.

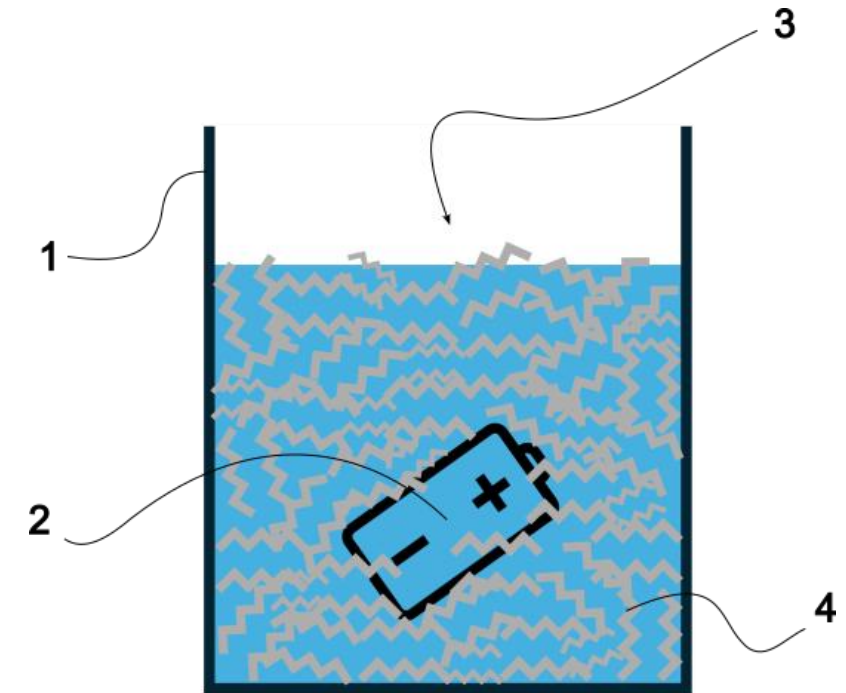
- Vybíjení zátěží („vybíjení odporem“).
 - Výhody: Bezpečnost a možná kontrola procesu. Možnost rekuperace energie
 - Nevýhody: Nevhodné pro hromadné zpracování (články spotřební elektroniky), vyžaduje individuální připojení každého článku.



A pictorial representation of solid medium discharge by (a) adjustable load, (b) electrical resistors for cells, and (c) MOSFET for modules. Reproduced from Bhar, M. et al. A review on spent lithium-ion battery recycling: from collection to black mass recovery. RSC Sustainability, 2023, 1(5), 1150-1167. doi: 10.1039/D3SU00086A. Licensed under CC BY 3.0.

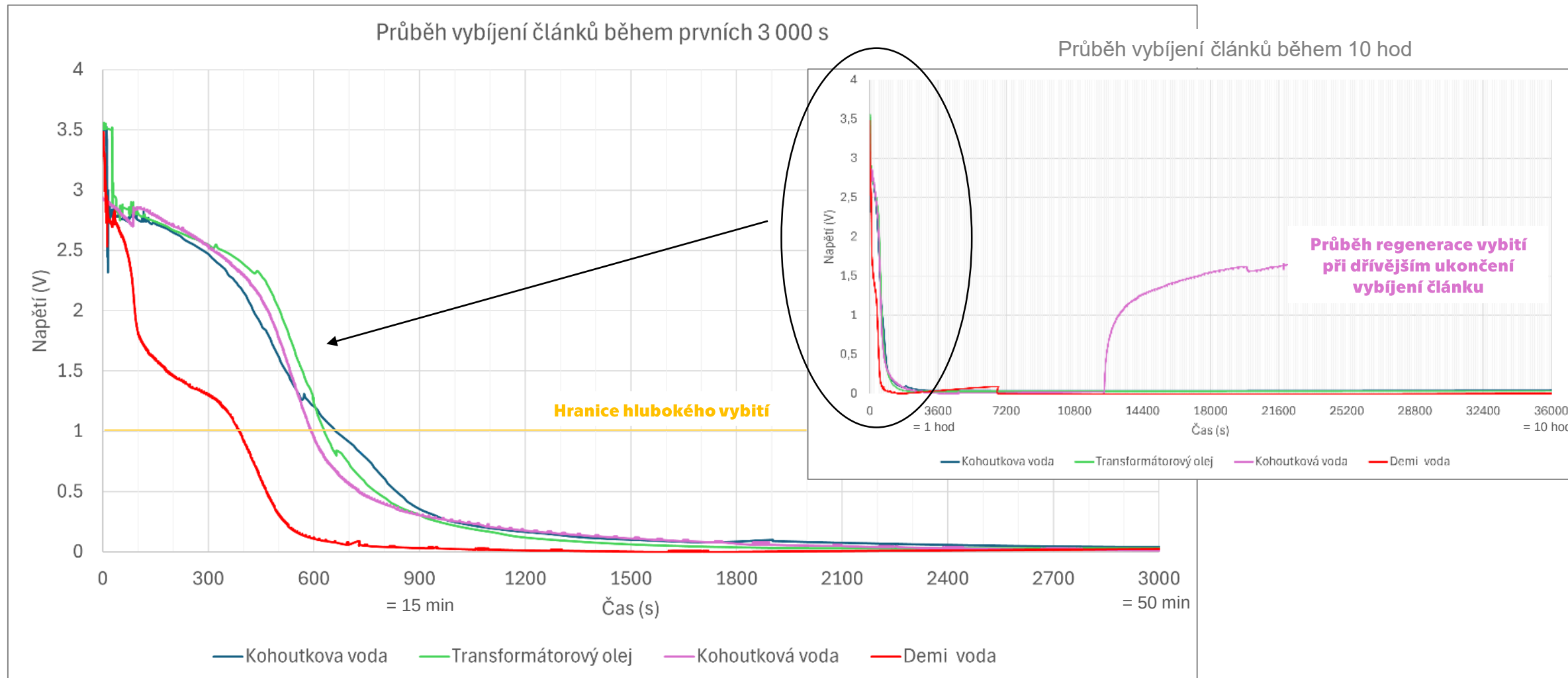
- Alternativní metoda vybíjení ke konvenčním elektrochemickým přístupům.
- Kompletní eliminace environmentálních a zdravotních rizik:
 - nedochází k porušení obalu → úniku materiálů baterií, vč. elektrolytu.
- Patent č. 310459 na ÚPV:
 - název metody: Způsob vybíjení bateriového článku,
 - přihlašovatel: ČVUT v Praze,
 - původci: Pražanová Anna, Zbyněk Plachý, Václav Knap,
 - **zveřejnění ve Věštníku ÚPV: 2. 7. 2025,**
 - nabytí právní moci po zveřejnění ve Věštníku.
 - podání na EPO: EP25157404.2, 12. 2. 2025.

- Vybíjení článků zkratovým proudem, který vzniká při propojení elektrodových kontaktů článků pomocí kovových fragmentů v chladicí kapalině.
- Charakterizace procesu:
 - rychlý pokles napětí na kontaktech článků (typicky pod 1 V během 30 min.),
 - kompletní vybití a poklesu celkového napětí bateriového článku (tj. včetně regenerace, pod 1 V) při vybíjení po dobu minimálně 10 hod.
- Dosažená hodnota napětí je bezpečná pro další kroky recyklačního předzpracování (drcení a mletí).

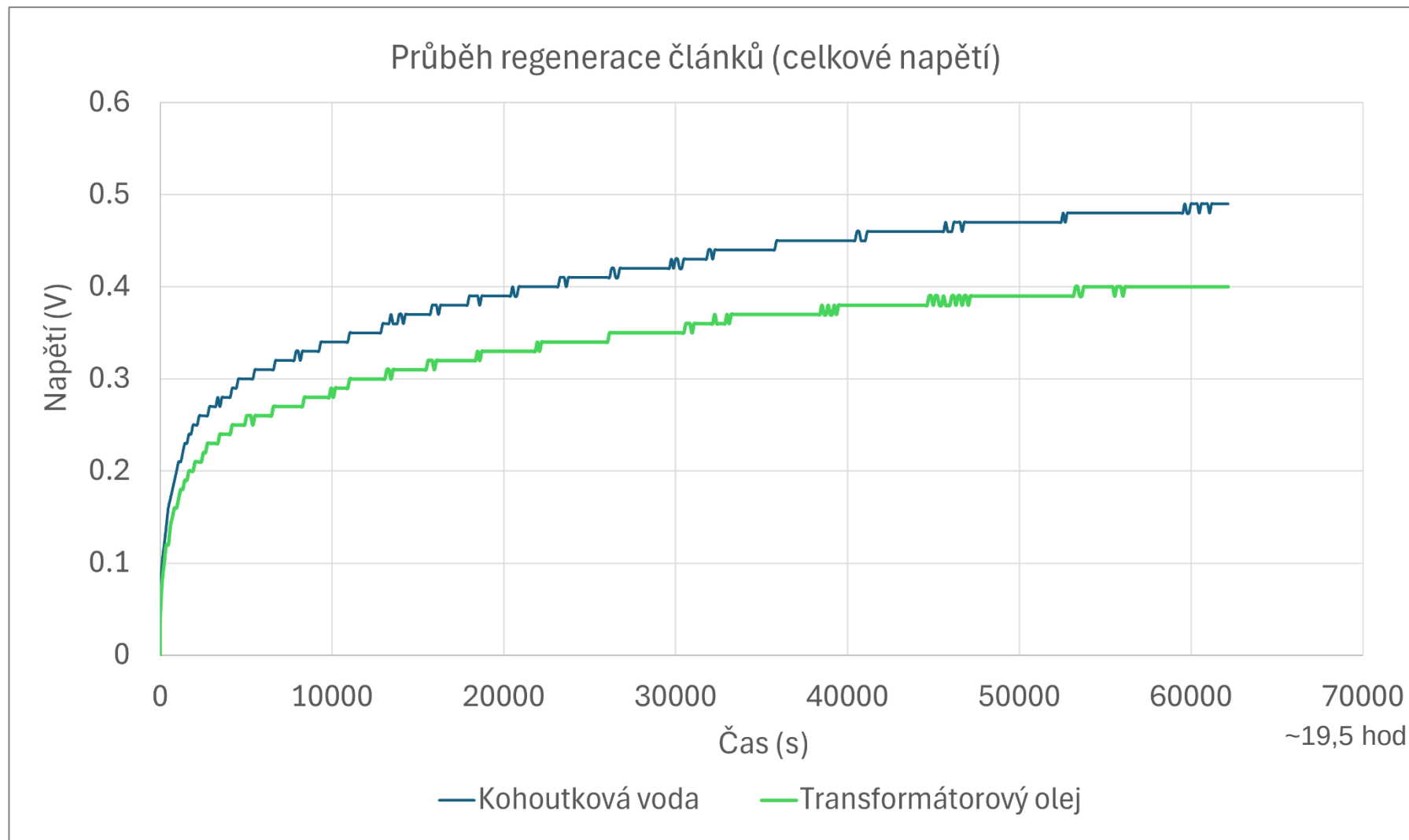


- 1 – nádoba pro vybíjení článku
2 – vybíjený článek
3 – chladicí kapalina
4 – vybíjecí médium

CHARAKTERIZACE VYBÍJENÍ

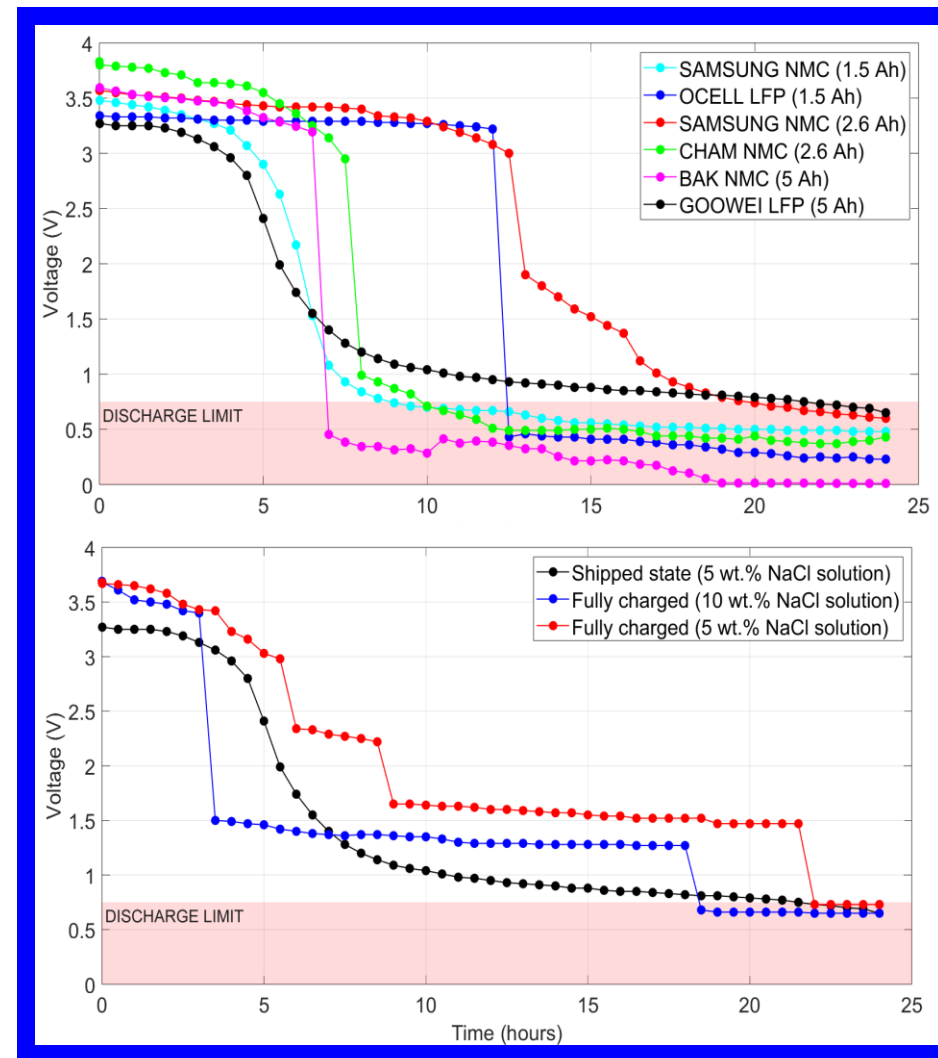
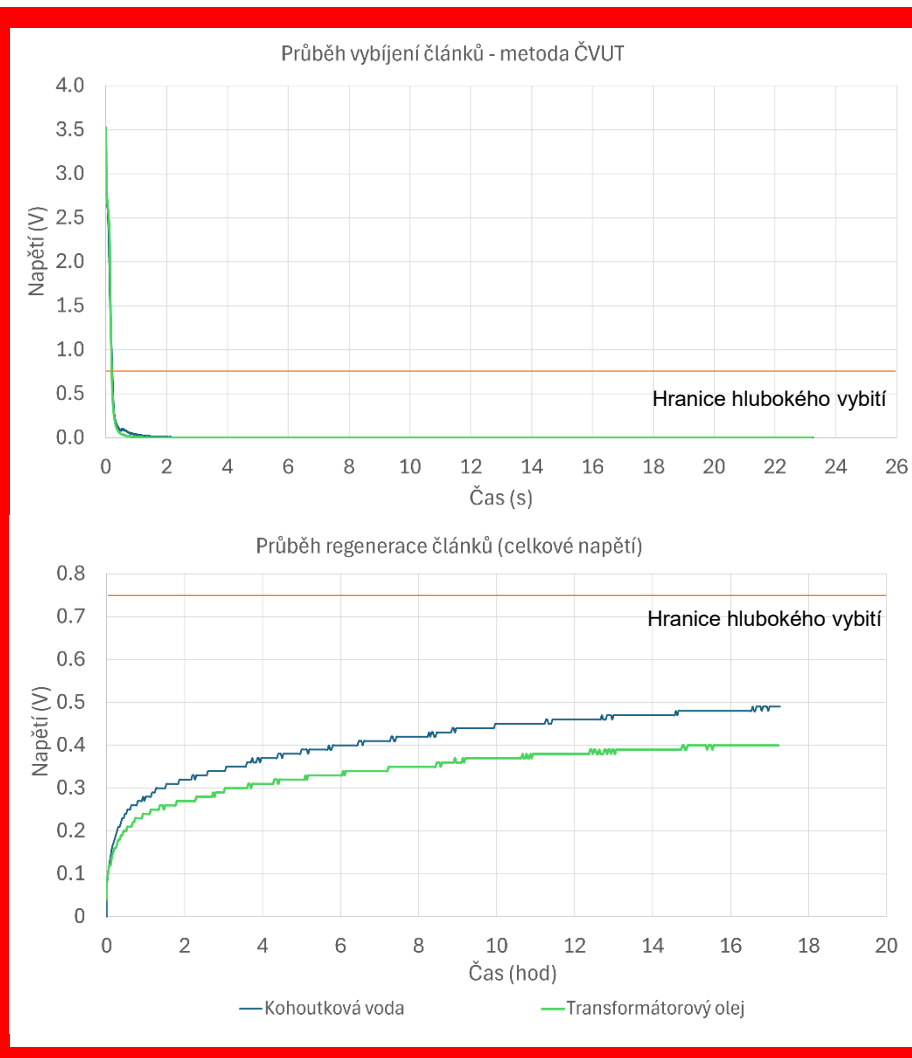


CHARAKTERIZACE VYBITÍ (REGENERACE)



SROVNÁNÍ: ÚČINNOST VYBÍJECÍCH METOD

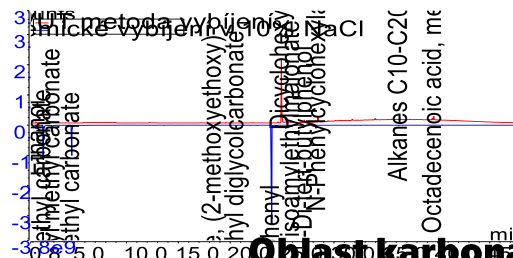
metoda ČVUT



elektrochemické vybíjení v roztoku NaCl

Pražanová, A. et al. Techno-Environmental Evaluation of Recycling Pretreatment of Cylindrical Lithium-Ion Battery: Discharging via Salt-Based Solution. doi:10.1109/ISSE57496.2023.10168348.

SROVNÁNÍ: INTEGRITA ČLÁNKŮ



**Oblast karbonátových sloučenin,
které tvoří základní složku
elektrolytického rozpouštědla**

Necílená identifikace neznámých těkavých organických látek ve vzorcích **chladičím média (metoda ČVUT)** a **vybíjecí lázně (elektrochemické vybíjení roztokem NaCl)** pomocí plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií (GC-MS).

metoda ČVUT



- **Kompletní eliminace vzniku nebezpečného kapalného odpadu.**
- **Zamezení úniku elektrolytu a dalších materiálů (kovů) díky zachování integrity obalu bateriových článků.**



- **Nízké náklady na čištění a likvidaci odpadních lázní.**
- **Maximalizace výtěžnosti cenných surovin během recyklace.**
- **Zvýšení celkové efektivity a hodnoty recyklačního procesu díky čistotě a neporušenosti materiálu.**

elektrochemické vybíjení



- **Produkce nebezpečného odpadu ve formě kontaminované vybíjecí lázně.**
- **Únik elektrolytu a cenných kovů do vybíjecího roztoku v důsledku narušení obalu článku.**
- **Nevratné poškození a degradace materiálů článku vlivem silné koroze.**



- **Vysoké finanční náklady na sanaci a likvidaci kontaminovaného roztoku.**
- **Přímé snížení výtěžnosti a ziskovosti recyklace v důsledku ztráty kovů.**
- **Technologická a finanční náročnost spojená s managementem nebezpečného odpadu.**

- Současné, konvenčně užívané, **metody vybíjení jsou neudržitelné.**
- Elektrochemické vybíjení v solných roztocích způsobuje korozi, kontaminaci a ztrátu cenných surovin, což snižuje efektivitu a ziskovost recyklace.
- Tradiční **alternativní metody** vybíjení nejsou zcela bezpečné, jsou ekonomicky a procesně náročné.
- **Metoda ČVUT** představuje **bezpečné a efektivní řešení**, které nabízí udržitelnou alternativu a posouvá recyklaci baterií blíže směrem k cirkulární ekonomice. Metoda:
 - eliminuje environmentální rizika,
 - zvyšuje výtěžnost a maximalizuje zisk cenných kovů,
 - snižuje náklady na nakládání s nebezpečnými odpady a zvyšuje celkovou hodnotu recyklačního procesu.

DĚKUJI ZA POZORNOST.

B&ESS-ČVUT

Vedoucí týmu odpadního zpracování:

Ing. Anna Pražanová, Ph.D.

anna.prazanova@cvut.cz

B&ESS-ČVUT

Vedoucí skupiny:

MSc. Václav Knap, Ph.D.

vaclav.knap@cvut.cz