

# Zelená chemie

Problematika rozpoštědel, separační techniky

Jaromír Literák



- Použití rozpouštědel:
  - Extrakce.
  - Krystalizace.
  - Reakční medium (rozpuštění látek, transport tepla).

## **Negativní aspekty užívání rozpouštědel:**

- Podstatný zdroj emisí VOC, až 40 % emisí neprůmyslového původu.
- Často těkavé, vysoce toxické nebo jinak škodlivé látky.
- Nutnost separace a čištění složek roztoku.
- Při výrobě ve vsádkových reaktorech rozpouštědlo tvoří 80–90 % hmoty. Často až 2/3 nákladů na výrobu chemické látky jsou vynaloženy na separaci a čištění.

## Strategie řešení:

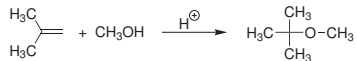
- Procesy bez rozpouštědel, možnost kombinovat s mikrovlnným ohřevem. Přístup problematický v aplikacích, které vyžadují velkou opakovatelnost (farmacie).
- Omezení počtu rozpouštědel – vyhneme se separaci směsí rozpouštědel, zjednoduší se požadovaná infrastruktura a složitost celého procesu.
- Snaha o provádění „one-pot“ reakcí v jedné směsi, bez nutnosti izolace látek mezi jednotlivými kroky.
- Využití rozdílné rozpustnosti reaktantů a produktů – oddělení produktu jako jiné fáze, krystalizace produktu z reakční směsi. Reaktant je jen částečně rozpouštěný v reakční směsi, vzniká z něj však rozpustný produkt.

## Strategie řešení:

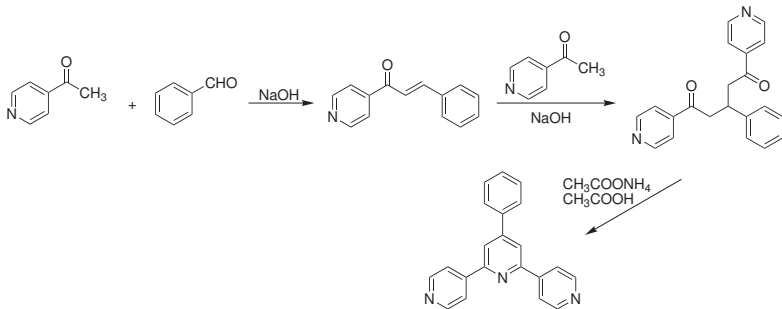
- Využití katalýzy fázového přenosu.
- Využití biotransformací, která probíhají ve vodě.
- Změnou tlaku nebo teploty můžeme zvýšit rozpustnost a tím snížit množství rozpouštědla (energie  $\times$  úspora rozpouštědla).
- Opětovné využití mateřských louhů (nebezpečí kontaminace a kumulace nečistot).
- Proces by neměl zahrnovat rozpouštědlo, které by dodávaným teplem vřelo!
- Užití benigních nebo netěkavých rozpouštědel.
  - Užití vody jako rozpouštědla.
  - Užití iontových kapalin.
  - Užití superkritických kapalin.
  - Využití perfluorovaných rozpouštědel.

# Procesy bez rozpouštědel

- Většina velkoobjemové chemické produkce probíhá bez rozpouštědla, tuto funkci zastupuje obvykle jeden reaktant.



- Použití rozpouštědla je často jen zvyk, který je z laboratoře přenášen do produkce!



- Příprava chalkonu a Michaelova adice v ethanolu poskytuje 50% výtěžek, produkt je potřeba před cyklizací rekrystalovat.
- Reakce bez rozpouštědla poskytuje 100% výtěžek.
- Podobně transesterifikace, kondenzace.
- Obtížný přenos tepla kompenzován využitím MW a US.
- Mnohé reakce však vyžadují určité koncentrační rozmezí reaktantů.

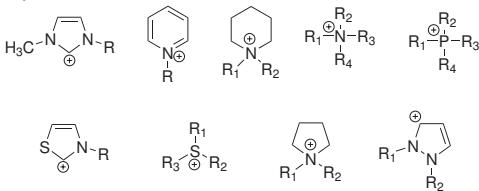
- Tavenina soli s teplotou tání do 100 °C (neskladnost kationtu a aniontu).
- První iontovou kapalinu  $\text{EtNH}_3^+ \text{NO}_3^-$  popsal v roce 1914 Paul Walden.
- Atraktivní vlastnosti iontových kapalin:
  - Nehořlavost.
  - Nízký tlak páry.
  - Laditelnost vlastností (polarita, mísitelnost, kat. vlastnosti).



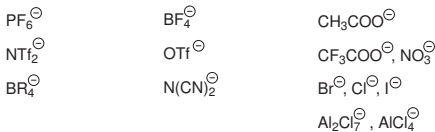
# Iontové kapaliny

- Často kombinace organického kationtu a slabě koordinujících aniontů.

Kationty:



Anionty:



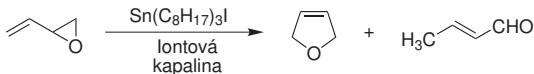
Roste rozpustnost v H<sub>2</sub>O



# lontové kapaliny vs. organická rozpouštědla

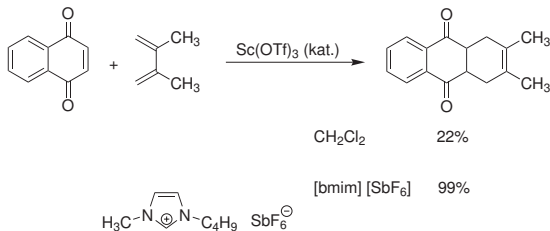
	Organický solvent	lontová kapalina
Počet	>1000	>1.000.000
Katalytické vlastnosti	Vzácné	Časté, laditelné
Chiralita	Vzácná	Častá, laditelná
Tlak par	Clausiova-Clapeyronova r.	Nízký
Laditelnost	Omezená	Velmi dobrá
Cena	Obvykle nízká	2–100 × běžných rozpouštědel

- Volbou kationtu i aniontu lze výrazně ovlivnit vlastnosti iontové kapaliny.
- Rozpuštěním v iontové kapalině lze imobilizovat katalyzátor.
- Proces firmy Eastman:



# Aplikace iontových kapalin

- Iontová kapalina vedle imobilizace ovlivňuje účinnost katalyzátoru:



- Podstatou je zvýšení kyselosti Lewisovy kyseliny (kation kovu) díky výměně ligandu s iontovou kapalinou.

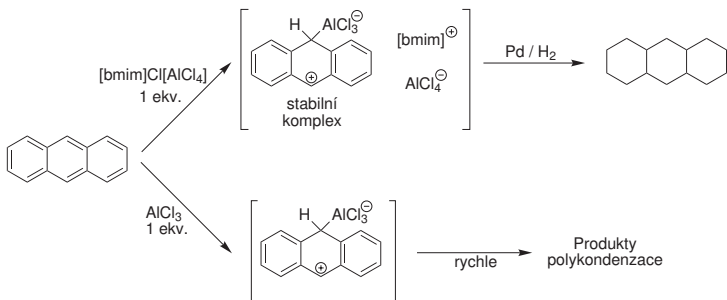


- Lze také připravit iontové kapaliny s aniontem vykazujícím Lewisovu kyselost, např.:

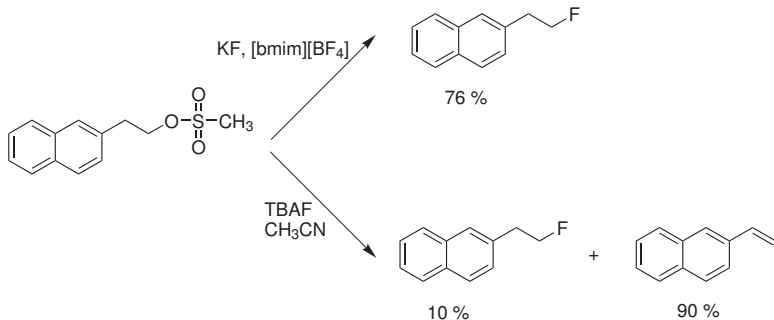


# Iontové kapaliny s Lewisovou kyselostí

- Iontová kapalina se sama chová jako katalyzátor, silná Lewisova kyselina:
  - Alkylace aromátů alkyny za lab. teploty.
  - Katalytická hydrogenace aromátů.

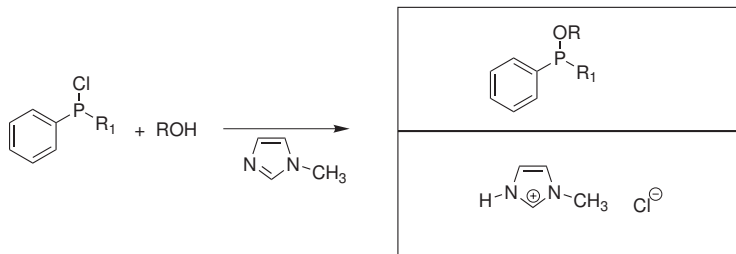


- Iontové kapaliny mohou také stabilizovat tranzitní stavy reakcí:



# Aplikace iontových kapalin

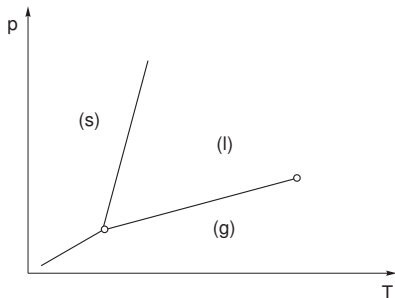
- Separace produktů reakce ve formě iontové kapaliny.
- BASIL (Biphasic Acid Scavenging Utilizing Ionic Liquids).



- Dříve se reakce prováděla v přítomnosti triethylaminu jako lapače HCl → obtížně dělitelná pastovitá směs produktu a solí.
- HCl s *N*-methylimidazolem tvoří druhou, snadno oddělitelnou fází, snadno recyklovatelnou.
- Zavedením procesu mnohonásobně vzrostla kapacita, zvýšila se čistota produktu (z 50 % na 98 %).

# Superkritické kapaliny

- Kapalina při teplotě nad kritickou teplotou a kritickým tlakem.



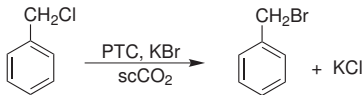
- Hustota podobná kapalině, viskozita a snadnost difúze připomíná plyn (snadný transport látky i energie).
- Vlastnosti lze měnit nastavením tlaku a teploty.
- Snadné odpaření roztoku.

# Superkritické parametry kapalin

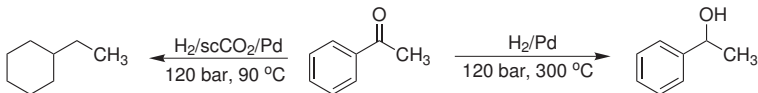
Solvent	$T_c / K (^{\circ}C)$	$p_c / MPa$	$\rho_c$
Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> )	304,1 (31)	7,38	0,469
Voda (H <sub>2</sub> O)	647,3 (374,1)	22,12	0,348
Methan (CH <sub>4</sub> )	190,4 (-82,7)	4,60	0,162
Ethan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	305,3 (-32,1)	4,87	0,203
Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	369,8 (96,6)	4,25	0,217
Ethen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	282,4 (9,2)	5,04	0,215
Propen (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	364,9 (91,7)	4,60	0,232
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	512,6 (239,5)	8,09	0,272
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	513,9 (240,7)	6,14	0,276
Aceton (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	508,1 (234,9)	4,70	0,278



- Nepochopitelně, špatně však rozpouští uhlovodíky, lépe malé polární molekuly (kvadrupólový moment molekuly CO<sub>2</sub>).
- Hlavně náhrada klasických rozpouštědel, pokud je jejich použití problematické z environmentálních nebo toxikologických důvodů (extrakce kofeinu, PCE v čistírnách).
- Rozpustnost látek v scCO<sub>2</sub> vzroste o několik řádů přidáním kosolventu, který je schopen s látkou interagovat specifickým způsobem, např. vodíkovou vazbou v případě alkoholů.
- Použití scCO<sub>2</sub> a jiných scL umožňuje provádět reakci i následnou separaci v jednom zařízení.
- Lze také použít PTC pro přenos látky mezi pevnou fází a scL.



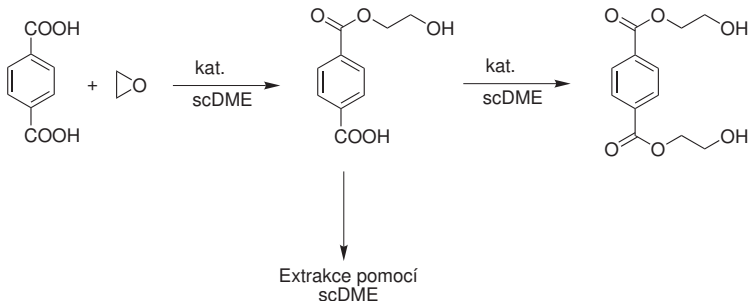
- Rozpouštědlo pro polymerace, hustota určuje stupeň polymerace.
- Příprava polykarbonátů z epoxidů, CO<sub>2</sub> je solventem i reagentem.
- Rozpouštědlo pro katalytické hydrogenace (vysoká rozpustnost H<sub>2</sub> v scCO<sub>2</sub>, rychlost hydrogenace často limitována difúzí).



- Rozpouštědlo pro oxidační reakce – nehořlavý.

# Superkritické kapaliny

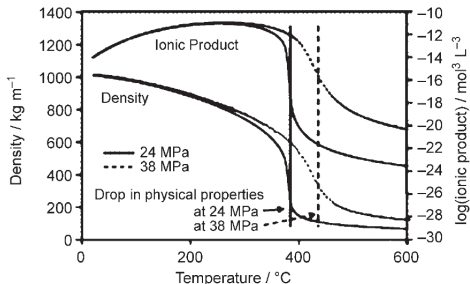
- Dimethylether ( $T_c = 126,9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_c = 5,24\text{ MPa}$ ) lze použít při selektivní přípravě mono(2-hydroxyethyl)-tereftalátu, monomeru pro přípravu PET:



- Vlastnosti scDME jsou nastaveny tak, že rozpouští monoester a nerozpouští katalyzátor a kys. tereftalovou.

# Podkritická voda jako rozpouštědlo

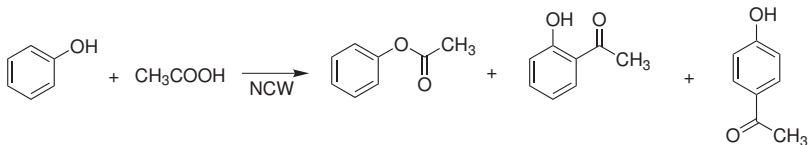
- Ideální rozpouštědlo pro iontové a radikálové reakce.
- NCW: oblast teplot 250–300 °C.
- Polarita vody za těchto podmínek srovnatelná s acetonem (rozpouští soli i organické látky).



- Hustota asi 0,7 g/ml, dielektrická konstanta 20 při 250 °C.
- Podkritická voda i  $\text{scH}_2\text{O}$  je vysoce korozivní vůči oceli.

# Podkritická voda jako rozpouštědlo

- Při 250 °C je o tři řády vyšší iontový součin vody  $K_W$ .
- Možnost provádět acidobazicky katalyzované reakce bez přídavku katalyzátoru!



- NCW může působit současně jako kyselý i bazický katalyzátor.

# Podkritická voda jako rozpouštědlo



# Voda jako rozpouštědlo

- Netoxická, nehořlavá, levná.
- Hydrofobní efekt může pozměnit průběh reakce.
- Velká tepelná kapacita (snadný odvod tepla, naopak však také pomalé zahřívání a chlazení).
- Destilace vysoce energeticky náročná.
- Obtížné čištění kontaminované vody.

# Plynem expandované kapaliny (GEL)

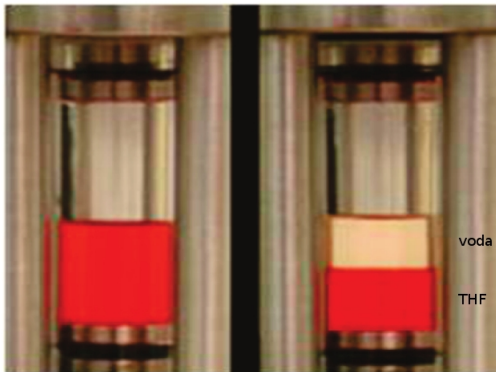
- CO<sub>2</sub> je špatné nepolární rozpouštědlo, plynný CO<sub>2</sub> je za tlaku (3–8 MPa) dobře rozpustný v organických rozpouštědlech (alkoholy, ethery, estery, ketony).
- Rozpuštěním CO<sub>2</sub> lze snížit (nastavit) polaritu rozpouštědla.
- GAS (gas antisolvent crystalization) jehož výhodou je tvorba zárodečných jader krystalizace v celém objemu (čištění  $\beta$ -karoténu).
- CO<sub>2</sub> může sloužit jako mísící činidlo při převádění dvoufázového systému (uhlovodík/perfluoruhlovodík) do jedné fáze, snížením tlaku dojde k opětovnému oddělení fází.



# Plynem expandované kapaliny (GEL)

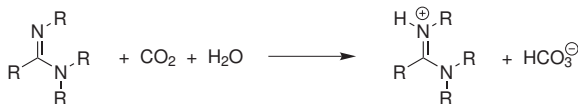
- $\text{CO}_2$  je lépe rozpustný ve vodě než v organických rozpouštědlech, nasycením jejich směsi opět dojde k oddělení fází.

3 MPa  $\text{CO}_2$

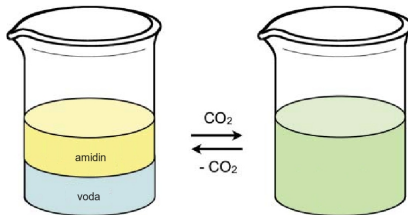


# Rozpouštědlo s přepínatelnou hydrofilitou

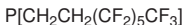
- Reakcí hydrofobního amidinu s oxidem uhlíčitým vzniká s vodou mísitelná kapalina, snížením tlaku dojde opět vyloučení neutrálního amidinu.



- Extrakce oleje ze sojových bobů amidinem, nasycením  $\text{CO}_2$  a smísením s vodou se vyloučí vrstva čistého oleje, která se oddělí.

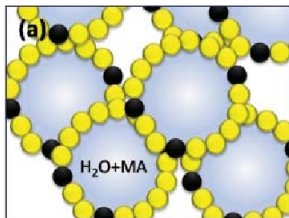


- Perfluorované alkany, ethery, trialkylaminy.
- Vysoce nepolární, slabé mezimolekulové interakce. Nemísitelné s naprostou většinou organických a anorganických rozpouštědel.
- Spojení fází lze dosáhnout za vyšší teploty, nasycením  $\text{CO}_2$ .
- Katalyzátor může být imobilizován ve fluorovaném rozpouštědle pomocí perfluorované kotvy, např. ligand v komplexu přechodného kovu:

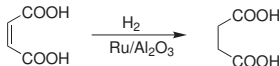


# Použití suché vody

- Inverzní pěna vznikající smísením vodného roztoku se silikagelem modifikovaným na povrchu hydrofobními skupinami (5 %). Chování prachu.



- Významný nárůst plochy rozhraní voda/vzduch.
- Kolaps pěny centrifugací nebo přidáním methanolu.



- Reakce nevyžaduje míchání.

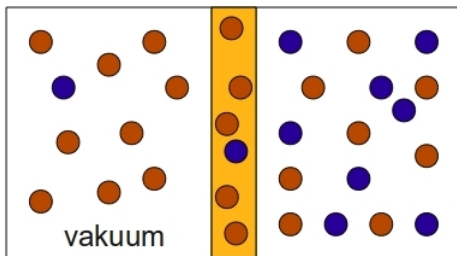
- Často velice energeticky náročné, obtížné a drahé operace, zdroj odpadů a jiné zátěže.
- Dosud převládá destilace, krystalizace.
- Existují nové alternativní metody, nejsou však ještě plně optimalizovány.

## **Homogenní separační metody:**

- Destilace
- Absorpce
- Chromatografie
- Krystalizace
- Membránové separace

## **Heterogenní separační metody:**

- Extrakce
- Centrifugace
- Flotace
- Filtrace



- Membrána je selektivní zábranou pro jednu složku, dělení založeno na rozdílu v rychlosti transportu látek membránou.
- Metoda vhodná pro separaci látek ze zředěných roztoků.
- Lipofilní membrána: polydimethylsiloxany.
- Hydrofilní membrány: polyvinylalkohol.