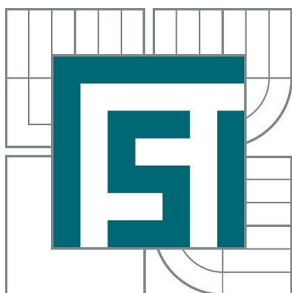


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# VLASTNOSTI GELŮ POUŽÍVANÝCH VE FLUIDNÍM INŽENÝRSTVÍ

CHARACTERISTICS OF GELS USED IN THE FLUIDS ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

IGOR HUDÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. SIMONA FIALOVÁ, Ph.D.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Igor Hudák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vlastnosti gelů používaných ve fluidním inženýrství**

v anglickém jazyce:

### **Characteristics of gels used in the fluids engineering**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše dostupných gelů používaných v technice s ohledem na jejich fyzikální vlastnosti.

Cíle bakalářské práce:

Roztřídění dostupných informací o fyzikálních vlastnostech gelů, zejména hodnot hustoty, viskozity, modulu objemové pružnosti, stlačitelnosti, povrchového napětí, součinitele přestupu tepla a pod.

Seznam odborné literatury:  
internet

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Simona Fialová, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 11.11.2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## Abstrakt

Gely představují v běžném životě určitý standard a ne jinak tomu je i v technickém užití. Dokáží nabídnout naprosto jedinečné možnosti použití v různých oblastech. Gelová struktura jako taková je sama o sobě velice zajímavým materiálem, přičemž její vlastnosti se velice těžko specifikují. Díky tomu, že celý „gelový“ systém je prostoupen obrovskou makromolekulární sítí, je možné pozorovat jeho odlišné vlastnosti ve srovnání s jinými běžně dostupnými materiály. Chování gelů se v některých oblastech konvenčním látkám blíží a v jiných zase oddaluje.

Proto se tato bakalářská práce zabývá popisem a sumarizováním jednotlivých schopností gelů ve vybraných odvětvích strojího průmyslu, kde se gely denně používají, například při utěsňování potrubních systémů, vodičů či elektronických součástí. Práce také mapuje jednotlivé principy vzniku gelu, s tím že pozornost je věnována stavbě gelové hmoty s ohledem na její mechanické a fyzikální vlastnosti. Výčet specifických použití v technických oborech je zakončen porovnáním vybraných vlastností gelů určených pro těsnění a zalévání elektroinstalace.

## Klíčová slova

Gel, biomechanika, hustota, viskozita, vlastnosti gelu

## Abstract

Not only in common life, but also in the technical area the usage of gels presents some kind of standard. Gels offer a unique possibility of usage in numerous areas. The gel structure itself is a very interesting material however it's hard to specify its characteristics. The gel system presents a huge macromolecular network which enables to observe its different characteristics in comparison to other materials. In some circumstances gels act almost as conventional materials, in other circumstances, however, they act significantly otherwise.

Therefore this bachelor thesis deals with a description and summarization of single characteristics of gels in chosen branches of the mechanical engineering industry where gels are used on a daily basis, such as sealant of pipeline systems, wires or electronic components. The thesis also describes principles of gel formation, with the emphasis to building of gel substance and with respect to its mechanical and physical features. In the end, the thesis gives a comparison of chosen characteristics of gels that are used as sealants and gels that are used for encapsulation of electrical set.

## Key words

Gel, biomechanics, density, viscosity, gel characteristics

HUDÁK, I. Vlastnosti gelů používaných ve fluidním inženýrství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vlastnosti gelů používaných ve fluidním inženýrství“ vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu a pod odborným vedením vedoucí bakalářské práce.

V Brně dne 24. května 2010

.....  
Igor Hudák

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval své vedoucí bakalářské práce paní Ing. Simoně Fialové Ph.D za vstřícný přístup, odbornou pomoc, za cenné připomínky a poskytnuté rady při zpracování bakalářské práce a také čas, který mi věnovala.





# Obsah

1. Úvod a cíl .....	10
2. Charakteristika gelů.....	11
3. Charakterizace gelů podle chování ve vysušeném stavu .....	11
3.1. Reverzibilní gely .....	11
3.1.1. Kovalentní gely.....	12
3.1.2. Fyzikálně síťované gely.....	15
3.2. Ireverzibilní gely .....	16
4. Vlastnosti gelů .....	17
4.1. Mechanické vlastnosti.....	17
4.2. Elektrická vodivost a difuzivita .....	17
4.3. Stárnutí gelů .....	18
4.4. Tixotropie gelů .....	18
5. Vytvrzování gelů.....	19
5.1. Vytvrzování při pokojové teplotě .....	19
5.2 Vytvrzování při vyšších teplotách.....	19
6. Rozdělení gelů podle použití .....	19
6.1. Těsnící gely .....	19
6.2. Gely pro zapouzdřování - dielektrické.....	19
6.3. Nízko extrahovatelné gely .....	20
6.4. Produkty pro extrémně nízké teploty .....	20
6.5. Tvrzené gely .....	20
6.6. Opticky čisté materiály .....	20
6.6. Tepelně vodivé gely.....	20
6.7. Jednosložkové gely vytvrzitelné UV zářením .....	21
6.7. Gely odolné vůči rozpouštědlům.....	21
7. Aerogel.....	21
7.1. Složení aerogelů.....	21
7.1.1. Aerogely odvozené ze silikátových materiálů.....	21
7.1.2. Aerogely vyráběné z jiných materiálů, než křemíku .....	22
7.1.3. Aerogely mají specifické struktury a extrémní fyzikální vlastnosti .....	23
8. Souhrnné vlastnosti gelů .....	23
8.1 Gely těsnící a gely pro zapouzdřování.....	23
9. Vlastnosti jednotlivých gelových produktů .....	25
10. Porovnání vybraných charakteristik.....	32
11. Diskuze .....	34
12. Závěr .....	35
13. Použitá literatura .....	36

# 1. Úvod a cíl

V moderním světě dochází ke stále častějšímu využívání nových technologií a zároveň dochází k rozvoji technologií stávajících. Totéž se týká i skupiny látek, které jsou nazývány gely. Jejich vlastnosti jsou často velmi blízké již zavedeným materiálům a produktům. Nicméně každá kategorie výrobků nabízí i určité specifické vlastnosti, typické pro jednotlivé konkrétní skupiny. Vyplatí se předem si stanovit požadavky, které jsou od produktů požadovány, to potom vede k lepší finální volbě a zároveň k optimalizaci celého systému. Ačkoliv se může zdát, že gel je nový materiál, tak je opak pravdou. Gely se využívají již více než sto let a stále se těší větší oblibě, a to hlavně proto, že nachází uplatnění v širokém spektru použití.

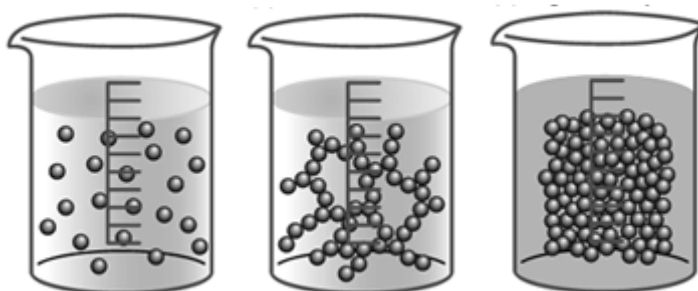
Důvodem proč, jsem si vybral zpracování rešeršní práce zabývající se problematikou gelů, je možnost využití poznatků z této problematiky v různých oborech. Věřím tomu, že v určitých ohledech se základní znalosti z této oblasti, mohou projevit jako zásadní při řešení různých problémů a dokáží tak přispět k získání nového pohledu na danou situaci, což může vést k unikátním výsledkům. Vždyť jenom možnosti případných aplikací jsou velice různorodé. Zajímavé je například použití gelů u sendvičových konstrukcí nebo jejich použití jako tepelné izolační materiály.

Cílem práce je na základě dostupných informací popsat problematiku gelů, včetně jejich rozdělení podle struktury, vzniku či použití v jednotlivých oblastech technického průmyslu. Jedním z úkolů je také porovnání vlastností gelových produktů s materiály, které jsou běžně dostupné na trhu či volně v přírodě. Mělo by také dojít ke zhodnocení vlastností a vyzdvižení kladných nebo případně záporných parametrů. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá především možnostmi využití gelů v technickém odvětví, budou i produkty vybrané pro srovnání vlastností právě z tohoto prostředí. Přičemž hlavní důraz by měl být kladen na oblast strojního inženýrství, konkrétně inženýrství fluidního.

## 2. Charakteristika gelů

Pojem „gel“ se běžně používá ve více významech, často je však těžké najít hranici mezi gelem a ostatními látkami. Snad nejčastěji se o gelech mluví jako o trojrozměrné makromolekulární síti makroskopické velikosti, která disponuje elastickými vlastnostmi. Ke vzniku takovéto sítě je zapotřebí množství chemických reakcí, které například zahrnují polymeraci molekul z nanočástic rozptýlených v roztoku. Předpokladem vzniku sítě je vytvoření dostatečného počtu uzlů mezi makromolekulami. Pokud vzniknou chemickou reakcí, pak se hovoří o kovalentních sítích nebo kovalentně zesíťovaných gelech. Druhou možností vzniku je mezimolekulární působení fyzikálních sil (van der Walsových, dipolárních sil, vodíkových vazeb), tak vzniknou fyzikálně síťované gely [1]. Proces vzniku gelu je nazýván gelace, pokud mají soly (heterogenní směsi, ze kterých může vzniknout gel) schopnost vytvářet gely mluví se o schopnosti gelatinizovat [2].

Podle toho, jestli gely obsahují rozpouštědlo, jsou děleny na lyogely a xerogely. Lyogely mohou být nazývány podle povahy rozpouštědla hydrogely (rozpuštědlem je voda) nebo organogely (rozpuštědlem je organická sloučenina). Lyogely dokáží pojmout až 99% rozpouštědla [3]. Při vysoušení lyogelu jsou pevné částice od rozpouštědla separovány a dávají tak vzniknout kompaktnímu xerogelu, jehož objem je menší o objem odstraněného rozpouštědla. Xerogel lze uvést zpět do původního stavu nabobtnáním, tím se převod na xerogel stává vratným [1].



Obrázek č.1 a) Roztok sol-gelu b) Trojrozměrná zesíťovaná struktura c) Xerogel s vysokou hustotou [4]

Při menších napětích se gely nedeformují trvale, ale elasticky, tzn. jenom dočasně [5]. To se projevuje i u lyogelů s vysokým obsahem rozpouštědla. Elasticita je zajištěna již zmíněnou makromolekulární sítí, kterou je celý systém prostoupen. Difuzivita nízkomolekulárních látek je jen o něco málo nižší než v původním roztoku, ze kterého gel vznikl. Přibližně na stejné úrovni pak zůstává i elektrická vodivost u gelů, které obsahují soli. Mechanické míchání a promíchávání tepelnými konvekcemi je u lyogelů omezeno na minimum kvůli vysokému zesíťování [1].

## 3. Charakterizace gelů podle chování ve vysušeném stavu

### 3.1. Reverzibilní gely

U reverzibilních gelů dochází při vysoušení ke zmenšování jejich objemu a mohou tak vznikat kompaktní xerogely. Dokáží přecházet zpět do původního

stavu přijímáním disperzního prostředí, tj. bobtnáním. Reverzibilní gely vznikají gelací roztoků lineárních polymerů nebo bobtnáním xerogelů [2].

### 3.1.1. Kovalentní gely

#### 3.1.1.1. Dělení kovalentních gelů

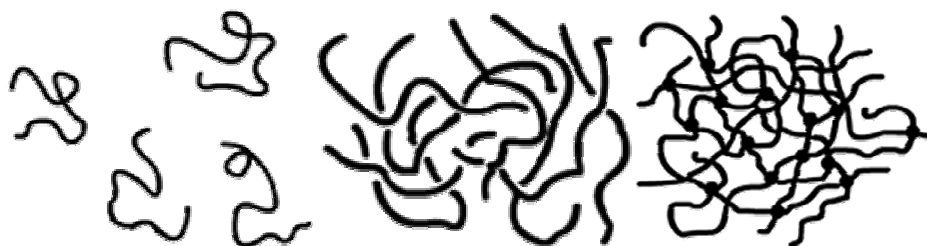
Kovalentní makromolekulární gel je prezentován jako nekonečná trojrozměrná síťovitá struktura, která je tvořená chemickými vazbami [2]. Slovo nekonečný je v tomto případě chápáno jako obří makromolekula, neodpovídají rozměrům běžných makromolekul, ale jsou mnohem větší. Takové struktury lze dosáhnout například způsobem síťování lineárního polymeru nebo síťovací polymerací [1].

- síťování lineárního polymeru - nejprve vznikají menší makromolekuly, u kterých jejich hmotnost a systém rozvětvení postupně narůstá. Největší makromolekuly rostou nejrychleji, v souvislosti s rychlostí růstu na sebe navazují další a další velké celky, tím pak vzniká trojrozměrná síť. O jistém okamžiku, kdy je dosažena nekonečná trojrozměrná síť, se může mluvit jako o bodu gelace [6]. Hmotnost gelového podílu roste na úkor hmotnosti rozpustného podílu, který se nazývá sol.
- síťovací polymerace – kopolymerace (chemická řetězová reakce, při které vznikne ze dvou či více nízkomolekulárních látek (monomerů) makromolekulární látka (kopolymer)) dvojfunkčního polymeru s vícefunkčním. Monomer je vícefunkční, pokud se do makromolekuly zapojí více vazbami [1].

#### 3.1.1.2 Charakteristika síťovité struktury

U gelové struktury jsou primárně rozlišovány dva základní pojmy - uzel sítě a řetězec. Uzel sítě je místo (Obrázek č.2), kde bývá síť spojena vulkanizací (chemická reakce, při které dojde ke vzniku obrovské makromolekuly) nebo vestavěním vícefunkčního monomeru. Část sítě, která se nachází mezi jednotlivými uzly je nazývána řetězcem. Jakmile dojde k zesíťování primárních lineárních řetězců, je patrná zřetelná změna ve struktuře. Za rozměr řetězce se považuje vzdálenost uzlů, do kterých je řetězec zapojen. Z n-funkční monomerní jednotky může vzniknout až n-funkční uzel. Při síťování existujících lineárních řetězců vznikají obvykle čtyřfunkční uzly.

Struktura gelů se může průběžně měnit v závislosti na podmínkách, kterým jsou vystaveny. Je všeobecně známo, že gely se používají i pro absorbování přebytečné vlhkosti a využívají tak své vlastnosti - bobtnání. Následně se jednotlivé uzly od sebe vzdalují a dochází tak k napřimování řetězců [1].



Obrázek č.2: Vznik uzlů, lineární řetězec se stává zesíťovaným. [7]

### 3.1.1.3. Deformace gelové struktury

Elastické materiály se při působení vnějších sil deformují okamžitě a vratně. Potom co pominou deformační účinky sil, se materiál vrací zpět do původního tvaru a objemu. Xerogely a lyogely, jakožto polymerní sítě, se chovají přesně podle tohoto modelu. Při teplotě vysoko nad teplotou skelného přechodu se vyznačují vysokou průtažností a nízkým modelem elasticity (ke značné deformaci stačí malá síla). Jejich deformace nenastává okamžitě, ale probíhá konečnou rychlostí, která je závislá na teplotě. Materiály, které se chovají tímto způsobem se nazývají elastomery (polymery, které se chovají jako guma [6]). Při zatížení gelu se také může měnit struktura, kdy dojde k natahování řetězce. Mezi uzly, které jsou orientované shodně jako nositelka zatěžující síly, dochází ke zvětšování mezer. Naopak pro uzly, které leží na kolmici k nositelce platí, že budou přitahovány blíže k sobě. I přesto, že je gel zdeformován a od původního stavu se struktura značně liší, zachovává si neustále informaci o původní struktuře. Při svém elastickém chování má pak tendence vracet se zpět do počátečního stavu.

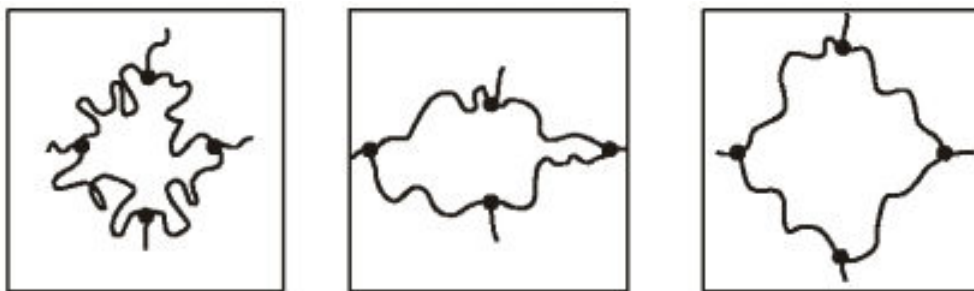
Účinek vnější síly působící na gel se přenáší na podstatnou část všech řetězců sítě a projevuje se i na jejich geometrických parametrech. Změna vzdálenosti úhlů způsobená deformací probíhá prostřednictvím mezimolekulární rotace, spojené s konformačními přechody vazeb v řetězcích sítě. Tento děj je energeticky nenáročný ve srovnání s dalšími možnostmi, tj. s protahováním vazeb nebo deformací vazebných uzlů [1]. (Obrázek č.3b)

### 3.1.1.4. Bobtnání kovalentních gelů

U trojrozměrné kovalentní struktury nemůže dojít k tomu, že se přemění v roztok. Dochází k pohlcování kapaliny nebo plynu a zvětšuje tak svůj objem, tzn. bobtná [6] (Obrázek č.3c). Při nedokonalém zesíťování dochází často k tomu, že se gely začnou rozpouštět v soly, proto se před měřením bobtnání odstraňují extrakcí. Vnikání rozpouštědla do polymerní fáze je přirovnáváno k osmóze (difúze vody skrz polopropustnou membránu). Gel má v tomto stadiu plně kovalentní strukturu, takže odpadá použití semipermeabilní (polopropustné) membrány, která by bránila přeměně gelu na roztok. V důsledku nabobtnání sítě na gel působí retrakční síla, která umožňuje průběh osmózy. Nabobtnání je tím menší, čím je větší hustota zesíťování. To je způsobeno tím, že hustěji síťovaný gel vyvíjí větší retrakční sílu a působí tak proti deformaci celého řetězce. Celý proces je proto závislý jak na gelu samotném, tak na použitém rozpouštědle. Obecně lze říct, že viskozita rozpouštědel je přímo úměrná stupni nabobtnání. [1]

Lze rozlišit dva typy bobtnání:

- Omezené – pohlcování kapaliny se v určitém bodě zastaví i v případě, že je kapaliny dostatek. To může být způsobeno tím, že se polymer s daným rozpouštědlem těžko směšuje. Druhou možnou variantou je síť vytvořená kovalentními vazbami, které nedovolují odpoutávání jednotlivých makromolekul.
- Neomezené – pohlcování kapaliny se nezastaví ve stadiu lyogelu, ale její absorpce pokračuje až do vytvoření roztoku. To bývá způsobené zánikem styčných bodů. Nejčastěji se vyskytuje u gelů spojených fyzikálními vazbami. [2]



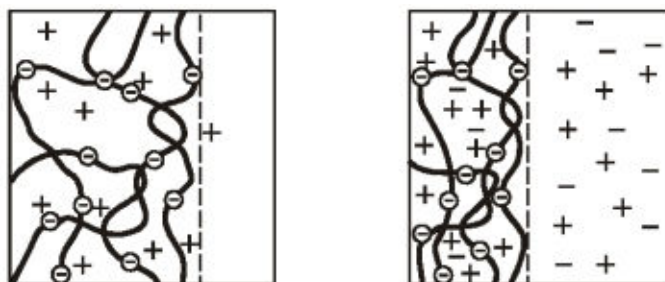
Obrázek č.3: a) V nezatíženém stavu b) Gel zatížený silou v jedné ose c) Výsledná struktura gelu po nabobtnání. [1]

### 3.1.1.5. Vliv konformační a síťovací entropie

Při bobtnání gelu přechází soubor řetězců z nejpravděpodobnějšího stavu, ve kterém platí Gaussova distribuční křivka, do stavu méně pravděpodobného, kde je řetězec  $n$ -krát větší. Záporná změna entropie je v literatuře uváděna jako konformační entropie. Na rozdíl od roztoku, kde se každý řetězec může pohybovat po celém objemu naprosto libovolně, musí být v gelové struktuře konce čtyř řetězců, které vytvářejí makromolekulární uzel sítě přítomny v jednom bodě. S touto potřebou je nutné počítat pro všechny uzly. Bez ohledu na konformaci řetězců se tím možný počet mikrouspořádání snižuje. Redukce je citelnější s narůstajícím objemem a efekt se tedy umocňuje s nabobtnáním. Při růstu řetězců se projevuje další úbytek entropie, která je v tomto případě nazývána entropií síťovací [1].

### 3.1.1.6. Bobtnání ionogenních gelů

Řetězce ionogenních gelů obsahují skupiny schopné elektrolyticky disociovat (rozkládat se, štěpit se). Pokud jsou v kontaktu s vodou nebo s vodným roztokem soli, ustálí se po nějaké době bobtnací rovnováha. Disociovaný nabobtnalý gel lze přirovnat k roztoku elektrolytu, oddělenému od vodné fáze polopropustnou membránou. Je-li nabobtnán čistou vodou, vyskytují se v mezerách expandované sítě spolu s molekulami ještě protiionty (částice nesoucí opačný náboj) vzniklé disociací gelu. Většina těchto iontů je schopna vlastního tepelného translačního pohybu, což snižuje chemický potenciál vody pohlcené gelem. Značný rozdíl koncentrací protiiontů mezi jednotlivými fázemi zvyšuje tendenci vody vnikat do gelu. Bobtnavost gelu je v porovnání s nedisociovanou sítí o poznání vyšší. Pokud dojde k přidání soli ustaví se mezi gelem a vnějším prostředím určitá rovnováha, čímž se sníží rozdíl mezi celkovou koncentrací pohyblivých iontů v gelu a vnější fázi, to vede k tomu, že gel má tendence „odbobtnat“. Při velkém obsahu soli je pak gel nabobtnán stejně, jako kdyby makromolekulární složka nebyla vůbec disociována [1]. (Obrázek č.4)

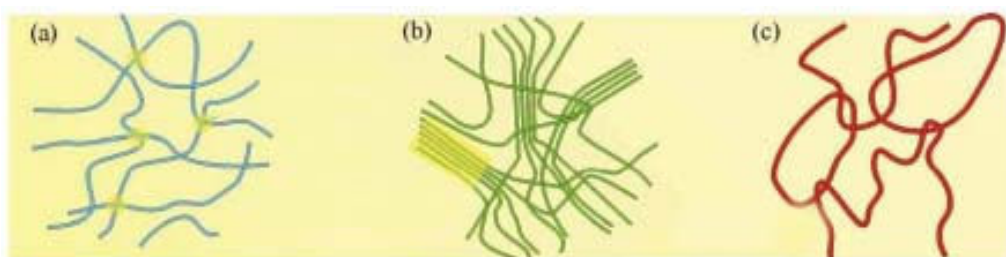


Obrázek č.4: a) bobtnání gelu v čisté vodě b) bobtnání gelu v roztoku soli [1]

### 3.1.2. Fyzikálně síťované gely

Fyzikálně síťované gely vznikají spojováním polymerních řetězců tak, že se úseky makromolekulárních řetězců sdružují působením fyzikálních sil do útvarů, které fungují jako uzly [2]. Spoje vzniklé tímto způsobem jsou v jednom nebo i ve třech rozměrech podstatně větší než kovalentní uzly, proto je vhodnější používat název uzlové nebo spojné oblasti. Makromolekuly, které jsou výrazně delší, se mohou začlenit do více než jedné uzlové oblasti, takže po délce řetězce se střídají zapojené části s volnými úseky, které si zachovávají ohebnost i tepelný pohyb. Doba trvání jednotlivých spojení uzlů se liší, proto je s ní potřeba počítat. Silné gely mají silné spoje a jsou podobně elastické jako kovalentní gely. U slabých gelů uzly takovou trvanlivostí nedisponují a chovají se elasticky pouze při nižších napětích. Při vyšších napětích se uzly rozpadají - síť zaniká. Po překročení tzv. statické meze toku se soustava deformuje trvale a chová se jako kapalina, vyznačuje se tak plastickým chováním.

Mezi fyzikální uzly se také řadí „zapleteniny“, které jsou projevem přitažlivých sil. Struktura se elasticky chová jenom dočasně, po uplynutí určité doby se řetězce rozpletou a mohou se tak od sebe vzdálit. Potom co vymizí elastická síla, nastane relaxace. Při dynamické rovnováze neustále vznikají a zanikají nové zapleteniny, roztok se tak může trvale deformovat v závislosti na charakteristické době relaxace a dává tak vzniknout pseudogelům (sloučenina co vypadá jako gel). V případě vzniku sítě, která je udržovaná spojnými oblastmi o dlouhé životnosti, není možné uzly přeskupovat. Proto nemůže docházet ani k žádnému zdokonalování. Přesto pomalu probíhají dodatečné samovolné reorganizační procesy, spojené s se snížením Gibbsovy energie (stavová veličina umožňující určit termodynamickou rovnováhu) - dochází ke zrání gelu [1].



Obrázek č.5: a) amorfní gel b) gel se submikroskopickými krystalickými oblastmi c) mechanicky zapletený gel [2]

#### 3.1.2.1. Gelace a termoreverzibilita gelů

Většina fyzikálních sítí je termoreverzibilní. Termoreverzibilním gelem je nazýván gel, který lze zahřátím transformovat na roztok a při ochlazení se mění zpět do původního stavu [2]. Teplota při které dojde k počátečnímu zformování gelové sítě se označuje jako teplota tuhnutí nebo také bod gelace [5]. Bod ztekucení nebo naopak teplota tání je teplota při které nekonečná síťová struktura vymizí [1].

Gelace je pomalý proces, při kterém sol přechází přes bod gelace na gel viskózní, který je následován polotuhými stadii [5]. Někdy nelze přesně určit okamžik, kdy gel úplně ztuhl nebo roztál. Jednoduše lze gelaci poznat na základě experimentu se zkumavkou obsahující gel. Jestliže gel ze zkumavky při naklonění nevytéká nebo pokud se vložená malá kulička, pomalu padající systémem ve zkumavce, zastavila,



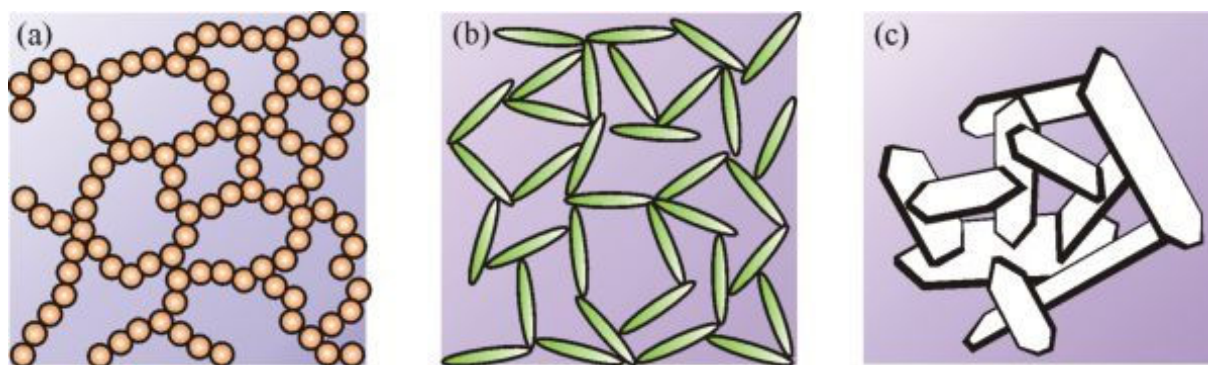
tak ve zkumavce proběhla gelace. Přesné stanovení, kdy se oscilující kulička v gelovém roztoku zastaví v důsledku nárůstu gelové struktury, se provádí magnetoreometrem [1].

Stává se, že teplota gelace je nižší než teplota tání gelu. Z toho plyne, že obě teploty závisí na historii vzniku gelu. Termín „termoreverzibilní“ zde vyjadřuje pouze obecnou schopnost soustavy prodělávat vlivem změn teploty přeměnu v obou směrech, ale v žádném případě se nejedná o proces vratný. V makromolekulárních systémech je vznik zárodků (nukleace) nové koncentrované nebo uspořádané fáze obtížný a pomalý proces, proto se při reakci využívá podchlazení [1].

### 3.2. Ireverzibilní gely

Ireverzibilní gely jsou považovány za neelastické, mluví se o nich jako o rigidních (tuhých) gelech, které se sušením mění na porézní xerogel o přibližně stejném objemu jako výchozí lyogel. Změnou oproti kovalentním gelům je, že xerogel nelze zpět přeměnit na lyogel. Xerogel sice dokáže vstřebat určité množství kapaliny (často značné), ale nenastane přeměna na původní rosolovitý stav [8].

Vznik ireverzibilních gelů je spojen s gelací lyofobních solů, k níž dochází obvykle při snížení agregátní stálosti soustavy. Částečným odstraněním ochranné vrstvy ztrácejí částice na některých místech povrchu stabilitu, což má za příčinu vzájemné spojení přímo na těchto místech. Přidáním elektrolytu o koncentraci nižší než koagulační práh (minimální koncentrace elektrolytu schopná vyvolat srážení lyofobního systému) se provádí odstranění stabilizujícího faktoru. Zásah je třeba provést tak, aby u částic nedocházelo ke koagulaci (srážení), ale aby vytvořily síťovitou strukturu. Vzniku gelu napomáhá zmenšení rozměrů částic při konstantní hmotnosti disperzního podílu (podíl látky, která je rozptýlená v látce jiné). Značný význam má pro tvorbu gelu tvar jejich částic, pokud jsou částice anizometrické, gel díky tomu vzniká mnohem snáze. V okamžiku, kdy je disperzní podíl tvořený jehlicovitými nebo destičkovitými částicemi, je pro vznik gelovité struktury zapotřebí menší koncentrace, než u solů se kulovitými částicemi. Na rychlost tvorby i na vlastnosti vznikajícího gelu může mít značný vliv teplota, naopak mechanický vliv v podobě míchaní, má opačný účinek [2].



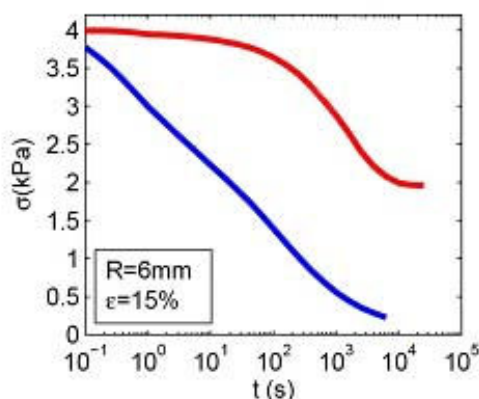
Obrázek č.6: Gelace lyofobních solů a) izometrické částice, b) tyčinkovité částice, c) destičkovité částice (s odlišně nabitými plochami a hranami - kaolinit) [2]



## 4. Vlastnosti gelů

### 4.1. Mechanické vlastnosti

Ačkoliv se u gelů vyskytuje kapalně disperzní prostředí (spojitá fáze v celém objemu soustavy), vykazují gely v důsledku jejich typického uspořádání mechanické vlastnosti, které jsou typické pro fázi tuhou. Při působení tečného napětí se až do jisté hodnoty dokáží chovat jako elastická tuhá tělesa. Hodnota kritického napětí je přímo úměrná koncentraci vazeb a jejich pevnosti. Jako značně elastické se chovají reverzibilní gely s kovalentními spoji, které disponují malým počtem vazeb v jednotce objemu. Čím více je vazeb mezi řetězci polymeru, tím menší je možnost změny tvaru makromolekuly a tím tužší bude i prostorová síť [8]. U gelů s fyzikálními spoji, se vyskytují zřetelné tixotropní vlastnosti a to jak v případě reverzibilních, tak ireverzibilních gelů. Pokud jsou přitažlivé síly působící v síťovité struktuře malé, dojde při prudkém protřepání ke změně na sol. Slabé vazby v důsledku mechanických vlivů zanikají [2]. U tixotropních látek je možné sledovat snížení viskozity při konstantní rychlosti deformace a zároveň se viskozita snižuje s rostoucí rychlostí ve smyku [9].



Obrázek č.7: Porovnání deformačních charakteristik mezi kovalentními (červená křivka) a ionogenními gely (modrá křivka). Oba dva gely mají podobný modul pružnosti, ale po zatížení vykazují každý jiný čas relaxace. [10]

### 4.2. Elektrická vodivost a difuzivita

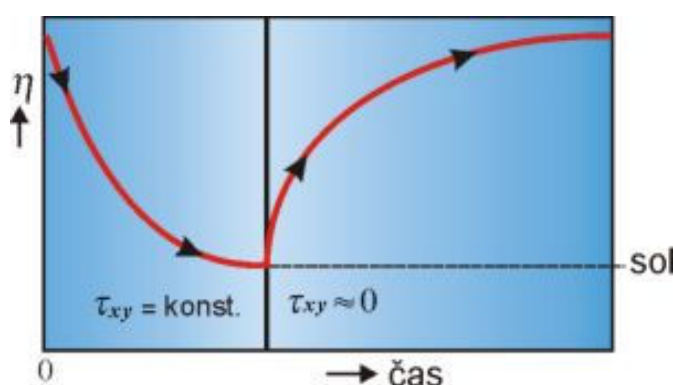
V disperzním prostředí a v prostorech mezi síťovou strukturou se malé molekuly a ionty rozpuštěných látek pohybují prakticky stejně rychle jako v solu. Elektrická vodivost u gelů, které mají v disperzním prostředí disociované nízkomolekulární elektrolyty, zůstane nezměněná tzn. skoro stejně vysoká jako v solu. Také difuzivita nízkomolekulárních látek v gelu je pouze nepatrně menší než v původním solu, ze kterého byl gel vytvořen, a to i přesto, že při gelaci rychle vzrůstá viskozita soustavy. Díky síťovité struktuře není difuzivita nízkomolekulárních látek v gelech téměř vůbec ovlivňována prouděním ani tepelnými konvekcemi [2].

### 4.3. Stárnutí gelů

U reverzibilních i ireverzibilních, které jsou čerstvé a které nejsou v termodynamické rovnováze, narůstá postupně s časem množství spojů. Dochází ke smrštění síťovité struktury, část přítomné kapaliny, která se původně v gelu vyskytovala, vytéká a nastává synerese (samovolné vytékání kapaliny z gelu, ke kterému dochází v důsledku smršťování síťovité struktury při stárnutí gelu) [8]. V průběhu stárnutí dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Je pozorován nárůst doby potřebné k relaxaci soustavy poté, co byla nějakým způsobem zatížena [11].

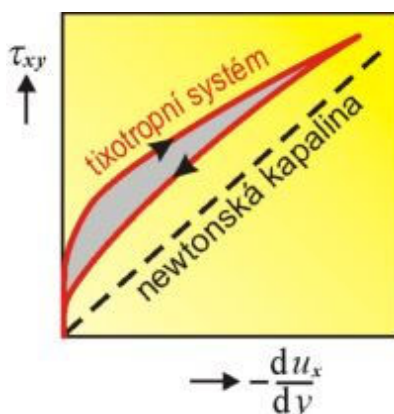
### 4.4. Tixotropie gelů

U řady gelů lze pozorovat, že reologická vlastnost některých pseudoplastických (pseudoplastické chování se vyznačuje poklesem velké počáteční zdánlivé viskozity při rostoucím napětí) a plastických (vůči napětím se deformují elasticky) systémů, které byly podrobeny smykovému namáhání (např. míchání, třepání), vykazují nejprve značnou zdánlivou viskozitu, která se však v průběhu času postupně snižuje. Není-li gel vystaven působením vnějších mechanických vlivů, původní struktura se obnovuje a viskozita se vrací na svou původní hodnotu.



Obrázek č.8: Časový průběh zdánlivé viskozity [2]

Vzniká zde tzv. hysterezní smyčka, což znamená, že průběh tokové křivky naměřené při pravidelném zvyšování napětí neodpovídá průběhu při následném snižování napětí.



Obrázek č.9 Průběh tokové křivky pro tixotropní a newtonskou kapalinu [2]

Jak u reverzibilních, tak i ireverzibilních gelů s fyzikálními spoji jsou patrné tixotropní vlastnosti. Nechá-li se ztekucený sol stát v klidu, vazby se pozvolna obnovují a dochází k nové gelaci a viskozita postupně dosáhne své původní hodnoty.

## **5. Vytvrzování gelů**

### **5.1. Vytvrzování při pokojové teplotě**

Tato metoda se ve většině případů používá pro dvou složkové gely. Po rozmíchání a následné aplikaci je gelu umožněno vytvrdnout při běžných pokojových podmínkách. Celkový čas samotného procesu vytvrzování se může lišit: U některých gelů dochází k vytvrzení během několika málo vteřin, u jiných to mohou být i hodiny. Použití pokojové teploty se doporučuje používat pro malé až středně velké objemy. Jednotlivé rychlosti vytvrdnutí gelů, jsou popsány v technických listech samotných výrobků [12].

### **5. 2 Vytvrzování při vyšších teplotách**

Všeobecně lze říct, že u všech typů gelů dojde k urychlení vytvrzování, pokud budou vystaveny vyšším teplotám. U jednosložkových gelů je dokonce jejich vystavení vyšším teplotám nezbytné, aby proces vytvrzování mohl vůbec začít. Limitujícím prvkem je jednoznačně tepelná hranice, ke které je možné se přiblížit, než dojde k rozpadání gelu.

## **6. Rozdělení gelů podle použití**

Kromě typických vlastností všeobecných gelů, jsou často požadovány vlastnosti specifické pro jedinečné použití.

### **6.1. Těsnící gely**

Těsnící gely našly využití také v oblasti hydraulických a potrubních systémů. Díky svým specifickým vlastnostem dobře přilnou k povrchu a vytvoří nepropustnou bariéru mezi vnitřním a vnějším prostředím, ať už se jedná o spoje mezi pevnými kovovými povrchy nebo plasty. Již od samotného nanesení, dokáží ve většině případů poskytnout okamžité utěsnění, avšak k maximálnímu účinku dojde až po vytvrzení. Díky tixotropním vlastnostem gely nestékají a drží na svém místě, což je značná výhoda.

### **6.2. Gely pro zapouzdřování - dielektrické**

V oblasti zapouzdřování jsou gely považovány za speciální třídu. Vytvrditelné zapouzdřovací gely se používají na místech, kde je potřeba zabránit poškození vlivem napětí, vlhkosti či zásahem elektrického proudu. Gely mají do jisté míry samoregenerační schopnost, kterou „převzali“ od kapalin a na druhou stranu disponují vlastnostmi typickými pro elastomery, jako je stálý tvar. Dokáží pohltit také množství energie způsobené vnějšími silami. Většinou bývají aplikovány v několika

vrstvách, aby byla dokonale zakryta místa, která je potřeba chránit. U drátových spojů se většinou používá vrstva o minimální tloušťce 2 milimetry.

Jednou z klíčových vlastností gelů je jejich lepkavý povrch, kterého dosáhnou při vytvrzení. Tato přirozená vlastnost umožňuje gelům přilnout k rozličným materiálům bez nutnosti použití nátěrů. Lepivý povrch se také podílí na jedinečné schopnosti gelů, regenerovat se, v případě poškození trháním nebo řezáním.

Gely je možné dělit na jedno či více složkové. Většinou se využívají dvou složkové gely, které se míchají v poměru 1:1 nebo v poměru jiném velice blízkém tomuto. Dvousložkové gely se mohou vytvrzovat v pokojové teplotě nebo v případě potřeby lze použít i teploty vyšší. Další skupinou jsou jednosložkové produkty eliminující potřebu promíchávat jednotlivé složky. Jednosložkové výrobky jsou vytvrzovány výhradně při vyšších teplotách [12].

### **6.3. Nízko extrahovatelné gely**

Gelová extrahovatelnost, může být změřena na základě ztráty váhy u vytvrzeného gelu ponořeného do rozpouštědla. Ztráta váhy vypovídá o odloučení části gelu z vytvrzeného materiálu v nabobtnalém stavu. Ve srovnání se standardními gely mají gely dielektrické přibližně o 25 až 50 procent menší extrahovatelnost v reakci s rozpouštědlem [12].

### **6.4. Produkty pro extrémně nízké teploty**

Standardně funguje většina gelů do - 54°C, avšak některé speciální gely vydrží až teploty dosahující - 80°C [12].

### **6.5. Tvrzené gely**

Pro použití, které vyžadují gely s vyšší pevností, je možno použít skupinu gelů tvrdých a pevných. Tyto materiály mají také zvýšenou chemickou adhezi, ale samotné vytvrzování je poněkud komplikovanější než u standardních gelů. Některé produkty umožňují rychlé vytvrzení už při pokojové teplotě [12].

### **6.6. Opticky čisté materiály**

Pro aplikaci v optice, se používají gely, které jsou vysoce transparentní v celém světelném spektru. Při srovnání jednotlivých druhů polymerů vyplývá, že gely jsou pro použití v optice ideální a to z důvodu umožnění přenosu jednou z nejvyšších rychlostí [12].

### **6.6. Tepelně vodivé gely**

Většina gelů je navržena bez použití vyplní. Pro aplikace, které vyžadují tepelný rozptyl a měkkou povahu silikonových gelů, se vyrábějí produkty, které výplň mají. Právě díky této změně se znatelně zvýší tepelná vodivost [12].

## 6.7. Jednosložkové gely vytvrditelné UV zářením

Nejčastěji je možné se setkat s gely na bázi silikonů, kterým k vytvrzení stačí pokojová teplota. Pro aplikace, kde je nutná vysoká rychlost vytvrzování, jsou dostupné gely vytvrditelné UV zářením. Tak je možné dosáhnout vytvrzení ve zlomku několika sekund. Využití této možnosti nachází zvláště u komponentů, které jsou citlivé na vyšší teploty [12].

### 6.7. Gely odolné vůči rozpouštědlům

Standardní silikonové gely jsou nepolární a jsou tak náchylné k nabobtnání v rozpouštědlech a palivech. Fluorosilikonové gely zvyšují polární povahu materiálu a zajišťují zvýšenou odolnost [12].

## 7. Aerogel

Aerogel je přímo vyroben z formy „mokrého gelu“, kdy je kapalinová fáze obsažená v roztoku nahrazena vzduchem. Pokud je gel vytvořen na vodném základu (hydrogel), tak je před zahájením vysoušení zapotřebí, vodu nahradit organickým rozpouštědlem. Naopak v případě, když je gel tvořen pomocí alkoholové struktury, není nutné dělat žádné další kroky a může se vysušovat přímo. Proces vysušování se provádí zvýšením teploty a tlaku na rozpuštěnou fázi, při snaze dostat se až za kritický bod gelové struktury. Tento „superkritický“ stav extrakce (vyluhování) snižuje povrchové napětí mezi kapalinou a póry na povrchu solidu (pevné látky), takže po ukončení celé reakce zůstanou póry naplněny plynem [13]. Pro svůj vzhled jsou aerogely často nazývány zmrzlým nebo modrým dýmem [14].

Superkritický vysušovací proces předchází obrovským tlakům, které vznikají při vypařování kapaliny z úzkých pórů. Veliké síly během vypařování jsou nepřímo úměrné velikosti pórů, konkrétně jejich poloměru. Často dochází k tomu, že pórovitý materiál je v důsledku vysokých tlaků porušen nebo dokonce úplně zničen. Některé známé chemické procedury dokáží zmírnit poškození způsobené procesem vysušování. Vysychání gelu v oblasti tlaků blízkého okolí se nazývá xerogel proces, při kterém vznikají aerogelové materiály [13].

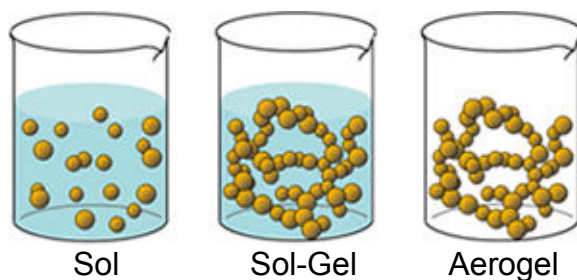
### 7.1. Složení aerogelů

#### 7.1.1. Aerogely na základě křemíku

Aerogely nelze charakterizovat jako specifickou chemickou strukturu. Mají spíše strukturní morfologii (jsou amorfní a vypadají jako nanopěna). Výzkumu v oblasti aerogelu se vědci věnují již více než 70 let. Křemíkové aerogely byly poprvé objeveny v roce 1931 Stevenem S. Kistlerem [15]. Navrhl nový technologický postup na výrobu aerogelu, který je označován jako Kistlerova metoda [13].

Pomocí Kistlerovy metody, jsou křemičité aerogely opakovaně proplachovány v bezvodém metanolu k odstranění stop vody. Kistler přivedl obsah gelů ke kritické teplotě metanolu (240°C a 11 MPa) a dovedl tak rozpuštěný roztok k tzv. superkritickému bodu. Pokus provedl v tlakové nádobě, kdy se pomalým snižováním tlaku snažil zabránit, aby se při opětovné kondenzaci nedostal metanol do pórovité struktury aerogelu. Samotný proces má spoustu nevýhod, jednou z nich je toxicita

metanolu a operování s vysoce hořlavým materiálem při vysokých teplotách a tlacích [13].

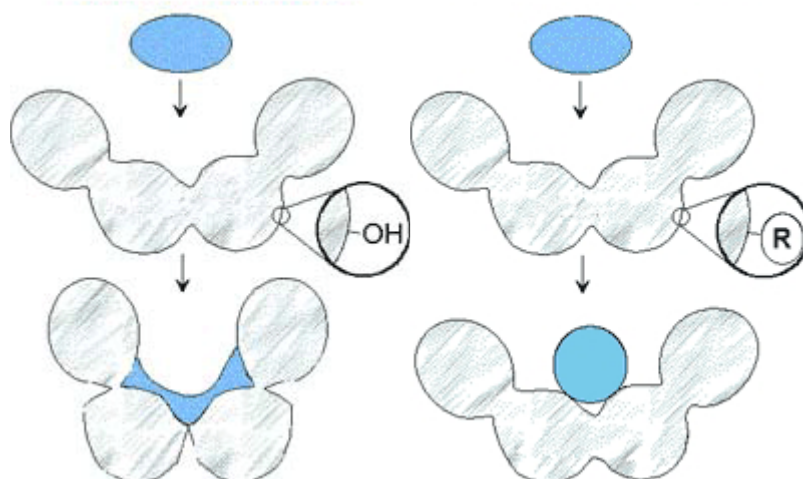


Obrázek č.10 Jednotlivá stádia, která vedou k výsledné struktuře aerogelu [13]

V průběhu sedmi desetiletí, které odstartovala Kistlerova klíčová práce, došlo ke zlepšení a značnému vývoji nejen v oblasti používání nových materiálů, ale i při odstraňování rozpouštědla. Teichner a kol. v šedesátých letech 19-tého století zavedli pro výrobu aerogelů nový standard, který eliminoval použití vody a alkoholu [16,17]. Teichnerův postup se opírá o použití kyseliny křemičité, která buduje sol částice. V průběhu procesu se vytváří trojrozměrná gelová síť a postupně zaplňuje obsah celé formy [13].

V posledních dvaceti letech se začal jako rozpouštědlo, pro sušení gelů používat oxid uhličitý. Proces se tak stal bezpečnějším a levnějším.

Aerogel se může chovat jak hydrofilně, tak hydrofobně. Ovlivněno je to rozdílem v páteřním systému. Na hydrofilní aerogel je navázána skupina OH, která vodu přitahuje, u hydrofobního aerogelu je naopak keto-skupina, která na vodu působí odpudivě (Obrázek č.11).



Obrázek č.11 Rozdíl mezi hydrofilním(nalevo) a hydrofobním(napravo). Modrá částice, představuje vodu, šedá skupinu aerogelu [18]

### 7.1.2. Aerogely vyráběné z jiných materiálů, než křemíku

V podstatě všechny kapaliny mohou zgelovatět, pokud se v kapalně fázi vytvoří souvislá mřížovitá struktura. Klíč pro výrobu nanopórovitého aerogelu zahrnuje vytvoření rovnováhy mezi růstem polymerového řetězce a mezi samotným zesíťováním, tak lze dosáhnout pórovité struktury a velkého povrchu. Tuhost gelu

musí být dostatečná na to, aby odolala kapilárním silám vznikajícím během odlučování rozpouštědla. Tato vlastnost je značně ovlivněna počtem spojů mezi sousedními řetězci v celém objemu gelu. V okamžiku, kdy je gel ve stádiu sol může být do křemičito-oxidové matrice začleněno více prvků, včetně organických polymerů, které dokáží provést naprosto unikátní modifikaci fyzikální vlastností aerogelu [13].

### **7.1.3. Aerogely mají specifické struktury a extrémní fyzikální vlastnosti**

Vysoce pórovitá struktura aerogelu zajišťuje, že aerogel má k dispozici velkou plochu povrchu na jednotku váhy. Například silica aerogel (křemičitý aerogel) s hustotou okolo  $100 \text{ kg/m}^3$  může disponovat povrchem v rozmezí  $800\text{-}1500 \text{ m}^2/\text{g}$  v závislosti na jednotlivých vstupních prvcích a také na postupu, jakým byl aerogel vyroben. Procentuálně vyjádřeno, u aerogelu o hustotě  $100 \text{ kg/m}^3$ , zaujímá otevřená struktura 94%, na pevnou složku připadá tedy jen skutečně malé množství objemu [13]. Další materiálové charakteristiky jsou uvedeny v *tabulce č. 11*.

## **8. Souhrnné vlastnosti gelů**

### **8.1 Gely těsnící a gely pro zapouzďování**

Těsnící gely mohou najít uplatnění v technice ve více odvětvích. Dokáží spolehlivě přilnout k rozdílným povrchům. Díky tomu, že je většina gelů vytvrditelná, jsou vhodné k zatěsnění spojovaných součástí z železných i neželezných kovů (např. šroubové vodovodní spoje, ventilová víka, skříně motorů a převodovek) nebo i plastů (vodovodní potrubí). Své využití nacházejí jak v oblasti strojírenství, tak v oblasti potravinářství, kde jsou vysoké nároky na čistotu. Tím, že mají gely kompaktní strukturu nehrozí žádná kontaminace. Kromě aplikací na potrubních systémech je možné používat gely, k utěsnění elektrických kontaktů při zapouzďování. Gely dokáží také odolat různým rozpouštědlům, nutno ale podotknout, že tato skutečnost závisí na konkrétním gelu. Doba, po kterou gel odolává, se mění v závislosti na složení gelu. V okamžiku, kdy bude gel vystaven kontaktu s agresivní látkou krátkodobě, dokáže odolat bez většího poškození. Více ukazuje *tabulka č. 1*.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>		Střední hodnota
Hustota	0,820 ÷ 2,82 g/cm <sup>3</sup>	1,21 g/cm <sup>3</sup>
Podíl solidů	3,00 ÷ 100 %	47,50%
Viskozita	3,00 ÷ 1,35e+6 cP	85400 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>		Střední hodnota
Tvrдость, stupnice A	0,410 ÷ 92,0	34,3
Mez pevnosti v tahu	1,03 ÷ 30,0 MPa	3,51 MPa
Mez kluzu	0,345 ÷ 6,07 MPa	2,75 MPa
Tažnost	15,0 ÷ 825 %	379%
Prodloužení na mezi kluzu	25,0 ÷ 620 %	293%
Modul elasticity	0,621 ÷ 4,59 Mpa	2,59 MPa
Pevnost ve stříhu	0,410 ÷ 3,24 MPa	1,13 MPa
Pevnost vazby	0,689 ÷ 3,10 MPa	1,73 MPa
Odolnost vůči trhání	3,73 ÷ 39,4 kN/m	8,84 kN/m
Odolnost vůči loupání	1,40 ÷ 14,0 kN/m	6,94 kN/m
<b>Elektrické vlastnosti</b>		Střední hodnota
Elektrický měrný odpor	0,000270 ÷ 1,63e+16 ohm-cm	1,64e+15 ohm-cm
Odpor povrchu	5,00e+10 ÷ 8,00e+16 ohm	1,88e+16 ohm
Izolační odpor	5,00e+14 ohm	5,00e+14 ohm
Permitivita	2,40 ÷ 6,30	3,17
Izolační pevnost	13,7 ÷ 630 kV/mm	24,0 kV/mm
Dielektrický průraz	1500 V	1500 V
Disipační faktor	0,000200 ÷ 0,0500	0,00652
<b>Tepelné vlastnosti</b>		Střední hodnota
Koeficient termální expanze	54,0 - 300 μm/m-°C	235 μm/m-°C
Měrná tepelná kapacita	1,46 J/g°C	1,46 J/g°C
Tepelná vodivost	0,0600 - 2,37 W/m-K	0,423 W/m-K
Maximální provozní teplota, na vzduchu	177 ÷ 316 °C	219 °C
Minimální provozní teplota, na vzduchu	(-)121 ÷ (-)40,0 °C	(-)60,1 °C
Teplota křehkosti	(-)115 ÷ (-)54,0 °C	(-)64,7 °C
Teplota skelného přechodu	(-)110 ÷ 200 °C	127 °C
<b>Podmínky použitelnosti</b>		Střední hodnota
Doba schnutí	0,0833 ÷ 4,00 hodin	0,948 hodin
Doba potřebná pro vytvrzení	0,00138 ÷ 96 hodin	0,16 min

Tabulka č.1 – Referenční tabulka - vlastnosti gelů [19]



## 9. Vlastnosti jednotlivých gelových produktů

### Těsnící gely

#### Loctite 518

Jednosložkový těsnící gel, který se vyznačuje střední pevností. K typickým aplikacím jsou řazeny utěšňování lícovaných spojů mezi pevnými kovovými povrchy nebo přírubami. Dokáže odolávat malým tlakům, již v okamžiku sestavení přírub. Díky tixotropním vlastnostem neztéká z místa nanesení. Čas úplného vytvrzení, uvedený v tabulce, se vztahuje na případ, kdy je vyplněna pouze tenká spára okolo 0,1 mm. Například v případě mezery o rozměru 0,5 mm dosáhne gel vytvrzení na 25% pevnosti až po 72 hodinách.

Fyzikální vlastnosti	
Hustota	1,13g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	500000 - 4500000 cP
Mechanické vlastnosti	
Pevnost v tahu(Ocel)	8,5 MPa
Pevnost ve smyku(Ocel)	7,5 MPa
Tepelné vlastnosti	
Maximální provozní teplota	149 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0,3 W/(m*K)
Měrné teplo	0,3 kJ/(kg*K)
Elektrické vlastnosti	
Vnitřní odpor	16e+15 ohm*cm
Odpor povrchu	57e+15 ohm
Další vlastnosti	
Čas vytvrzení	0,5-4 hodin
Čas úplného vytvrzení	24 hodin

Tabulka č.2 - Vlastnosti gelu Loctite 518 [19,20,21]

#### Loctite PRISM 4212

Jednosložkový gel, do kterého byly pro dosažení lepšího vytvrzení přidány elastomery. Produkt se vyznačuje výbornou odolností proti vlhkosti a teple. Je možné ho vytvrdit při pokojových teplotách. Dokáže spolehlivě utěsnit různé typy materiálů jako jsou ocel, hliník, ABS a PVC. Gel dosáhne hodnot udávaných výrobcem přibližně za 24 hodin od aplikace. Výhodou je, že gel odolává poměrně vysokým teplotám.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1,05g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	5000 ÷ 16000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Střihová pevnost (Ocel)	25 ÷ 29 MPa
Střihová pevnost (Hliník-vyleptaný)	12 ÷ 16 Mpa
Střihová pevnost (PVC)	4 ÷ 6 Mpa
Střihová pevnost (ABS)	3,7 ÷ 4,3 Mpa
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	121 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0,1 W/(m*K)
Teplota skelného přechodu	165 °C
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení	0,1 hod
Čas úplného vytvrzení	24 hod

Tabulka č.3 - Vlastnosti gelu Loctite PRISM 4212 [19,20,21]

## Loctite 572

Tento gel se vyznačuje vysokou tixotropií. Nevyžaduje žádné míchání, protože je to jednosložkový gel, nicméně pokud aplikace vyžaduje rychlejší vytvrzení je možné použít aktivátor, který celý proces urychlí. Používá se pro utěsnění a zajištění kovových potrubí a armatur. Je navržen jak pro nízko, tak vysokotlaké aplikace. Částečné utěsnění nastává prakticky okamžitě, k úplnému vytvrzení dojde během 72 hodin. Pokud je použit aktivátor dojde k urychlení vytvrzení.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1.25g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	14500 ÷ 77000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Zatěžovací záběrný moment (na M10)	20 MPa
Záběrný moment (na M10)	7 MPa
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	149 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0.1 W/(m*K)
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení	0,1 hod
Čas úplného vytvrzení	72 hod

Tabulka č.4 - Vlastnosti gelu Loctite 572 [19,20,21]

## Loctite 574

Produkt dokáže utěsnit lícovaná spojení mezi dvěma pevnými kovovými povrchy nebo přírubami. Umožňuje vytvrzení i bez přístupu vzduchu. Typickým použitím je těsnění v tuhých přírubových spojích, například ve skříních motorů či převodových skříních. U menších spár je opět vytvrzení rychlejší, u spáry okolo 0,5 mm se po 72 hodinách gel vytvrdí na přibližně 40 % maximální tvrdosti. Aktivátorem lze dosáhnout úplného vytvrzení již za 1 hodinu.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1,11g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	23000 ÷ 120000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Pevnost v tahu (Ocel)	5 MPa
Pevnost ve smyku (Ocel)	6 - 8,5 MPa
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	149 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0,1 W/(m*K)
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení	0,25 ÷ 2 hod
Čas úplného vytvrzení	12 hodin

Tabulka č.5 - Vlastnosti gelu Loctite 574 [19,20,21]

## Loctite 5331

Jednosložkový gel není po vytvrzení určen pro vysokotlaká zařízení, ale je ideální pro plastová potrubí, kde se dopravuje jak teplá, tak studená voda. K vytvrzení dochází při pokojové teplotě.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1,1g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	50000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Zatěžovací záběrný moment (na M10)	4,5 N*m
Záběrný moment (na M10)	1,5 N*m
Maximální povolovací moment	1 N*m
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	121 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0,1 W/(m*K)
Teplota skelného přechodu	165 °C

Tabulka č.6 - Vlastnosti gelu Loctite 5331 [19,20,21]

## Loctite 577

Výrobek je navržen pro těsnění kovových potrubí a přírub, často se používá i na závitové spoje. V okamžiku, kdy je spoj utažen a ke gelu se nedostává vzduch, dochází k vytvrzení. Poté co k vytvrzení dojde, poskytuje gel ochranu před šokem a vibracemi. K nejrychlejšímu nárůstu vytvrzení dochází u mosazi.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1,09g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	16000 ÷ 130000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Zatěžovací záběrný moment (na M10)	11 N*m
Záběrný moment (na M10)	17 N*m
Maximální povolovací moment	17 N*m
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	82,2 °C
Minimální provozní teplota	(-)54 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0,1 W/(m*K)
Měrné teplo	0,3 kJ/(kg*K)
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení	0,25 hod
Čas úplného vytvrzení	8 hodin

Tabulka č.7 - Vlastnosti gelu Loctite 577 [19,20,21]

## Izolační gely

### ACC QGel 300 QSI

Dvousložkový těsnicí gel, který se míchá v poměru 1:1. Obě složky mají jak stejnou hustotu, tak viskozitu. Dokáže ochránit před vibracemi a utěsnit požadované místo tak, že se k němu nedostane voda. Své využití nachází hlavně při izolaci elektrických spojů. Disponuje také dobrými dielektrickými vlastnostmi.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	0,97 g/cm <sup>3</sup>
Viskozita (Složka A)	1000 cP
Viskozita (Složka B)	1000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Pevnost v tahu (Ocel)	5 MPa
Pevnost ve smyku (Ocel)	6 ÷ 8,5 MPa
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	200 °C
Minimální provozní teplota	(-)55 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	80e-6 1/K
Tepelná vodivost	0.1 W/(m*K)
<b>Elektrické vlastnosti</b>	
Vnitřní rezistivita	2,1E+15 ohm*cm
Izolační konstanta	>18,5 kV/mm
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení (při 25°C)	24 hod
Čas vytvrzení (při 100°C)	0,2 hod

Tabulka č.8 - Vlastnosti gelu ACC QGel 300 QSI [19,21]

### Resin Technology Group TIGA 159 LV-UV

Za normálních podmínek vytvrzení probíhá pomalu, jeho rychlost však lze zvýšit pomocí UV záření. Gel je určen k zalévání a těsnění všude tam, kde je vyžadována protekce před šokem. Plně vytvrzený gel poskytuje pevné přilnutí ke všem druhům povrchů a navíc je odolný vůči plynům, výparům, rozpouštědlům vyrobených z ropy či slabým kyselinám.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	1.27g/cm <sup>3</sup>
Viskozita (pryskyřice)	2000 cP
Viskozita (tvrdidlo)	7000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Tvrdost, stupnice D	40
Pevnost v ohybu	37,9 MPa
Rázová zkouška	2,14 J/cm
<b>Elektrické vlastnosti</b>	
Izolační pevnost	16,1 kV/mm
Disipační faktor	0,038
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	121 °C

Tabulka č.9 - Vlastnosti gelu Resin Technology Group TIGA 159 LV-UV [19 ,21]

### Silicone Solutions - SS-4060, 5060, 6060 a 6080

Skupina těchto gelů se vytvrzuje při pokojových teplotách, všechny čtyři jsou dvousložkové a při míchání se používá poměr 1:1. K vytvrzení dojde přibližně za 180 minut pokud jsou podmínky normální. V případě vystavení gelu vyšším teplotám je možné dosáhnout vytvrzení, již za 15 minut. V okamžiku, kdy dojde k vytvrzení, gel odolává ozonu, vlhkosti, UV a vysokým teplotám. Používají se k utěsňování elektrických obvodů a zabránění prostupu vlhkosti.

<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	0,98 g/cm <sup>3</sup>
Viskozita	1000 cP
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Tvrdost, stupnice A	až 30
Záběrný moment (na M10)	7 MPa
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Maximální provozní teplota	250 °C
Minimální provozní teplota	(-)65 °C
Součinitel tepelné roztažnosti	1e-3 1/K
<b>Elektrické vlastnosti</b>	
Izolační pevnost	>10 kV/mm
Disipační faktor	0,001
Vnitřní resistivita	10e+15 ohm*cm
<b>Další vlastnosti</b>	
Čas vytvrzení	3 hod
Čas vytvrzení (při 150 °C)	0,25 hod

Tabulka č.10 – Vlastnosti skupiny gelu SS od výrobce Silicone Solutions [19,21]

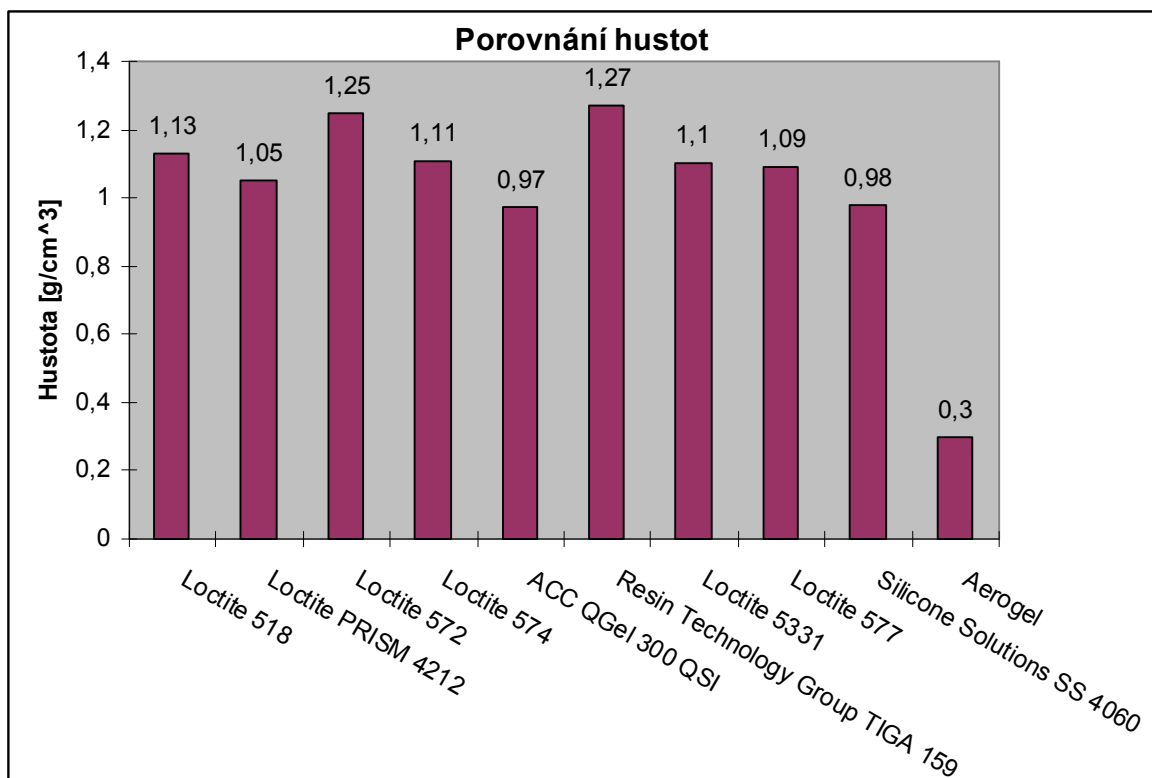
## Aerogel

Aerogel lze použít všude tam, kde je potřeba důsledná tepelná izolace, i malá vrstva aerogelu dokáže odrazit velké množství tepelné energie, protože má nízkou tepelnou vodivost. Díky svým vlastnostem nachází také uplatnění v kompozitních sendvičových strukturách. Použití ho lze například i v oblasti přesné mechaniky a optiky, nejčastěji se nachází využití při aplikacích v energetice.

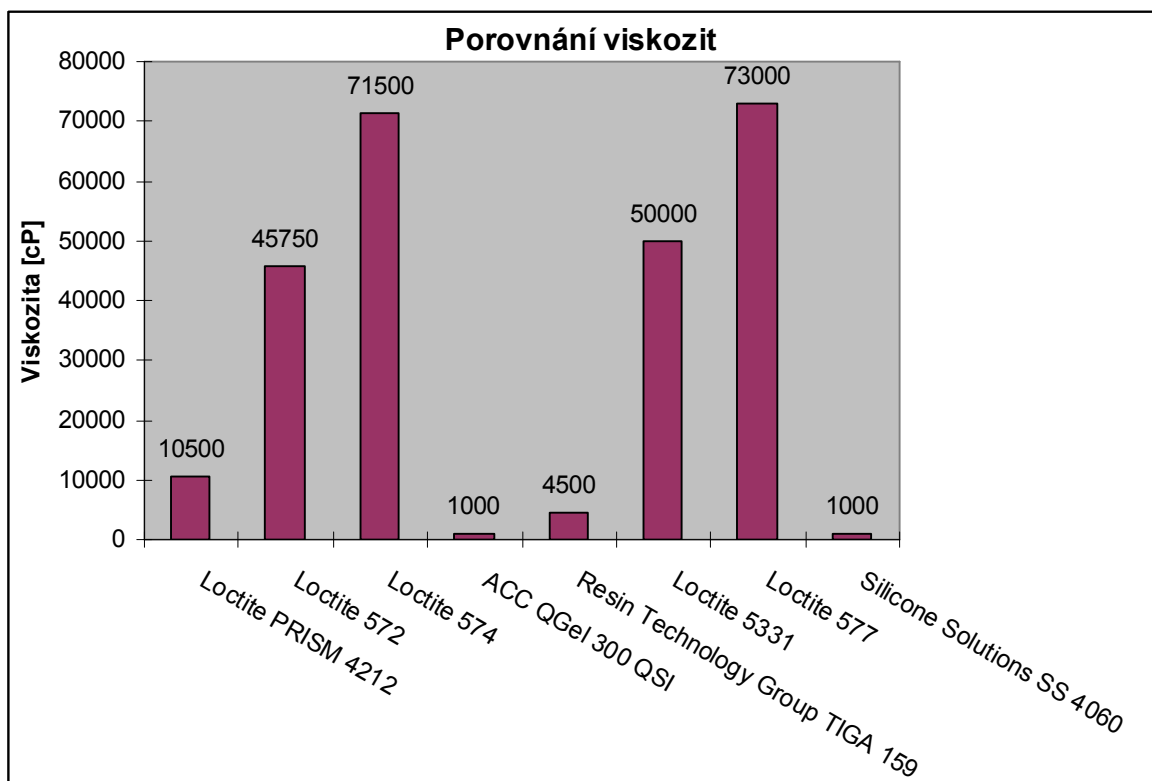
<b>Fyzikální vlastnosti</b>	
Hustota	0,0100 ÷ 0,300 g/cm <sup>3</sup>
Velikost částice	0,00200 ÷ 0,00500 μm
Povrch	800 m <sup>2</sup> /g
<b>Mechanické vlastnosti</b>	
Napětí v tahu	0,160 Mpa
Modul pružnosti	1 ÷ 10 MPa
Tlakový modul	0,300 Mpa
<b>Elektrické vlastnosti</b>	
Elektrický odpor	1.00e+15 ohm-cm
Permitivita	1,14
<b>Tepelné vlastnosti</b>	
Koeficient tepelné roztažnosti (20 ÷ 80 °C)	2,00 1/K
Tepelná vodivost (vakuum)	0,00400 W/m-K
Tepelná vodivost (vzduch)	0,0160 W/m-K
Maximální provozní teplota	500 °C
<b>Optické vlastnosti</b>	
Index lomu	1,00 ÷ 1,05
<b>Další vlastnosti</b>	
Podíl solidu	0,13 ÷ 15%
Rychlost zvuku v aerogelu	100 m/s

Tabulka č.11 Vlastnosti aerogelu [19]

## 10. Porovnání vybraných charakteristik

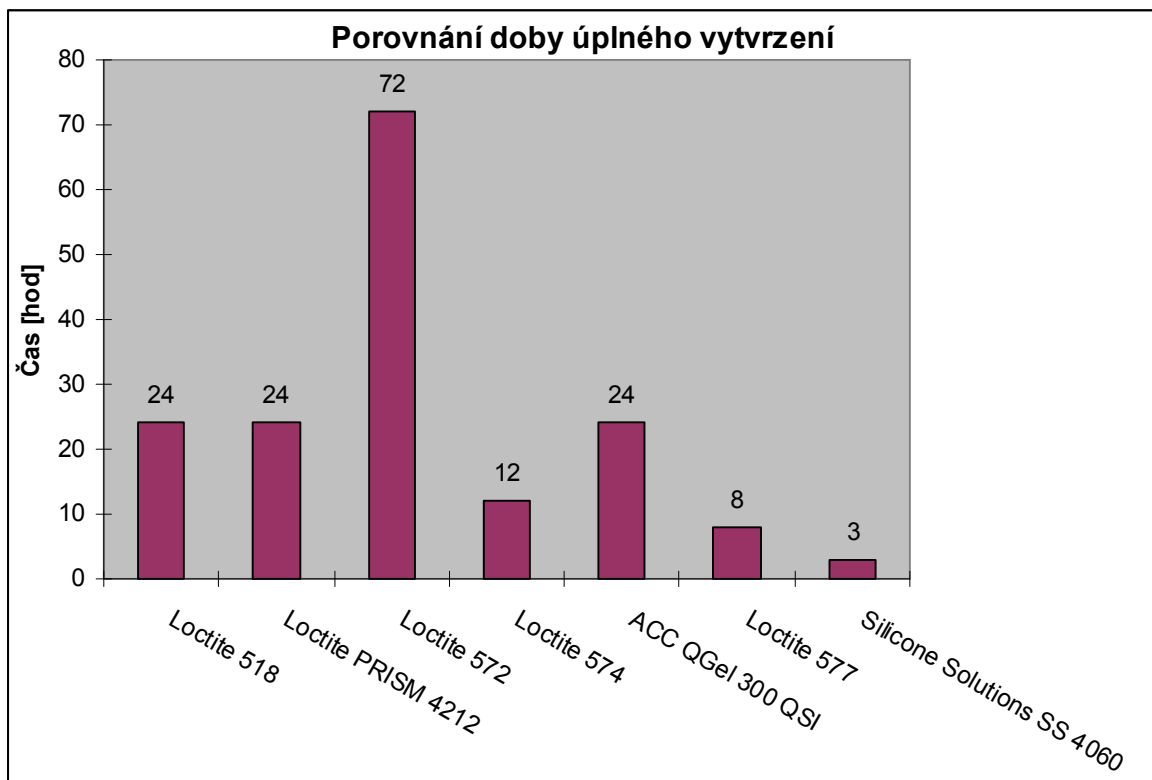


Graf č.1 – Porovnání hustot vybraných produktů

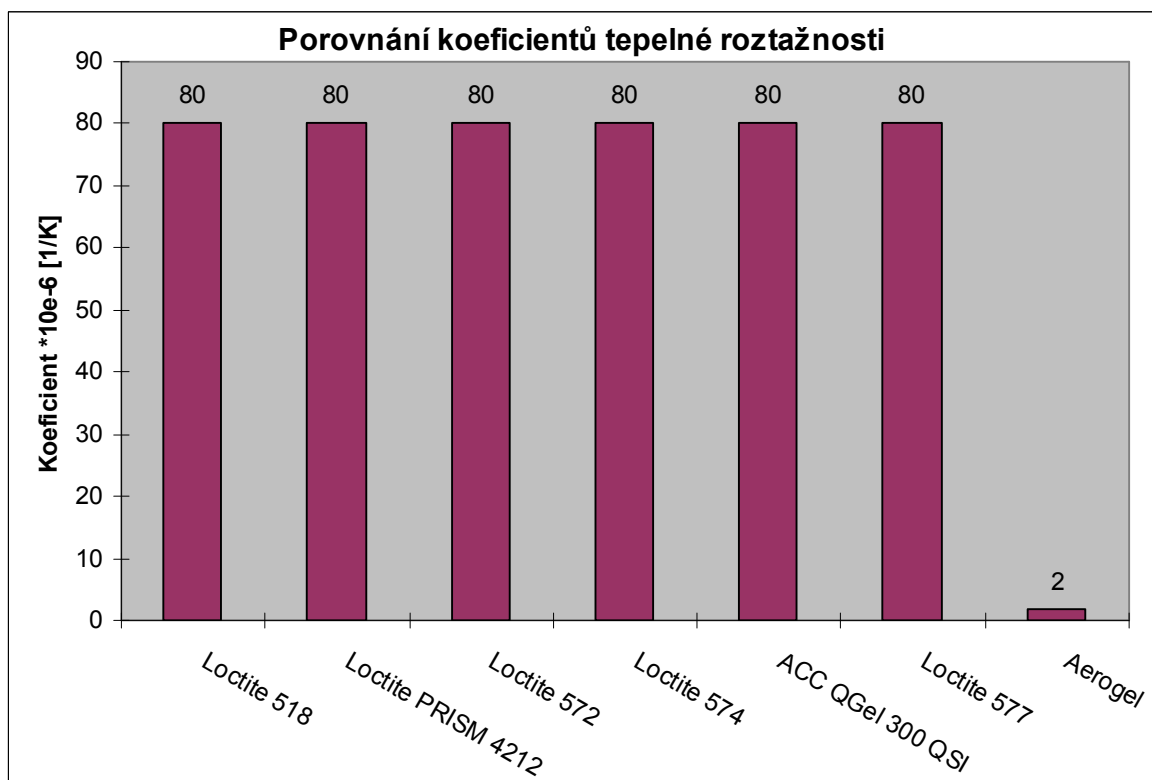


Graf č.2 – Porovnání viskozit u vybraných produktů





Graf č.3 – Porovnání doby úplného vytvrzení u vybraných produktů



Graf č.4 – Porovnání koeficientů tepelné roztažnosti

## 11. Diskuze

V první části se práce věnuje různým složením gelů včetně jejich možné aplikace. Výčet případných použití gelů není kompletní, je nutné zmínit gely ve stavitelství sloužící jako izolační vrstvy, či vstřikovací gely pro zacelení spár a trhlin. Gely se uplatňují i v energetice například jako nemrznoucí směsi do kolektorů, využívají se také pro výrobu baterií, které slouží jako stejnosměrné zdroje. Gely lze najít i v průmyslech, kde se vyrábějí LED diody. Použití gelů je velmi rozmanité, svůj úkol plní i v biochemii při elektroforéze či ve sloupcové chromatografii, kde je využita základní vlastnost gelu vázat na sebe vodu. V chromatografii gel dokáže absorbovat rozpuštěné částice ve vodě a odfiltrovat je, vzniká tak čistý roztok.

Ve druhé části byly vybrány některé gely (Loctite 518, Loctite PRISM 4212, Loctite 572, Loctite 574, Loctite 577, Loctite 5331, Loctite ), které jistým způsobem reprezentují skupinu těsnících gelů používaných pro účely utěsnění potrubí, armatur, či jiných kovových či plastových spojů. Druhou skupinou jsou gely (Acc QGel 300 QSI, Resin Technology Group TIGA 159 LV-UV, Silicone Solutions - SS-4060, 5060, 6060, a 6080), které se používají pro utěšňování elektrických a elektronických obvodů, či případně mohou být použity k utěsnění některých nízkotlakých systémů. Třetí samostatnou skupinu xerogelů reprezentuje křemičitý aerogel.

Při srovnání jednotlivých produktů (*Graf č.1*) z hlediska hustoty je patrné, že hustota většiny gelů se pohybuje kolem jediné hodnoty a to zhruba kolem  $1 \text{ g/cm}^3$ . Z tabulky č.1 je zřejmé, že referenční hodnotou pro hustotu je hodnota  $1,21 \text{ g/cm}^3$ . Proto lze konstatovat, že vybrané gely více či méně reprezentují průměrné vlastnosti z hlediska hustoty materiálu. Na základě tohoto poznání je vidět, že některé gely dosahují podobné hustoty jako voda. Když se vezmou v potaz pevné látky, které disponují pevnou krystalickou mřížkou, je vidět, že gely z daleka takových vysokých hodnot nedosahují. Na druhou stranu kapaliny mají hodnoty hustoty nižší než gely. Je ale důležité mít na paměti, že hlavně záleží na tom, jaké materiály jsou posuzovány.

Graf č.2 nabízí zhodnocení viskozit jednotlivých gelů. Zde je vidět, že hodnoty již nejsou tak vyrovnané, to vypovídá o odlišném chování gelů. V grafu je vždy zanesena střední hodnota viskozity, protože rozsah, kterého gely nabývají, je často velmi široký. V grafu není uveden výrobek Loctite 518, a to proto, že jeho viskozita vysoce převyšuje ostatní gely a došlo by tak ke zvětšení měřítko, což by mělo za následek nepřehlednost grafu. Při pohledu do tabulky č.1 je vidět, že hodnoty viskozity mohou nabývat extrémních hodnot, nicméně vybraný vzorek těsnících gelů se v několika případech přibližuje ke střední hodnotě. V případě porovnání gelů s vodou z hlediska viskozity, některé z nich dosahují podobné hodnoty jako má samotná voda a to  $1000 \text{ cP}$  (pozn.  $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ). Každopádně je zde i další skupina gelů, jejichž viskozita je mnohonásobně vyšší. Ty se pak mohou vyznačovat vysoce tixotropními vlastnostmi. Běžné látky jako benzín, ethanol, kyselina mravenčí, rtuť, toluen mají oproti většině gelů viskozitu nižší.

Z grafu věnujícímu se době potřebné pro vytvrzení je vidět, že pokud dojde na zhodnocení vytvrzení při běžných pokojových podmínkách je většina gelů schopná poskytnout maximální možné utěsnění a tvrdost již za 24 hodin. Téměř ve všech případech je možné použít aktivátor, který umožní vytvrzení gelu v kratším čase. Této skutečnosti je možné využít například v provozech či aplikacích, kdy je nutné, aby gel byl v co nejkratší době schopen poskytnout maximální využití jeho potenciálu. Samozřejmě jednou z nevýhod je vyšší cena.

Všechny vzorky vybraných těsnících a dielektrických gelů mají stejnou hodnotu koeficientu tepelné roztažnosti. Při pohledu na referenční tabulku, je možné vyvodit, že sice spadají do intervalu, nicméně jsou pod hranicí střední hodnoty. Při srovnání s aerogelem je vidět, že aerogel opět vykazuje naprosto rozdílnou hodnotu, což svědčí o tom, že se jedná o jinou materiálovou strukturu. Na rozdíl od vody, PVC, betonu, či prvků z periodické tabulky prvků (rtuť, hořčík, hliník, měď, zlato) mají gely větší koeficient tepelné roztažnosti, což znamená, že při působení tepla jsou schopné se rozpínat a poskytnou tak ještě lepší utěsnění.

Je patrné, že gely vůči kovovým materiálům nedosahují takových vysokých hodnot mezi pevností. Aby bylo dosaženo objektivního zhodnocení je výhodnější spíše sledovat rozdíly mezi vlastnostmi gelů a polymerů. Některé gely dosahují podobných vlastností jako polymery, ale takových je jenom malé množství. Pokud se vezme v úvahu struktura gelu, není to zase až takové překvapení, že gely mají v tomto hledisku horší vlastnosti. Výhodou gelů ovšem je, že se dokáží do jisté míry regenerovat.

## 12. Závěr

Cílem této práce bylo charakterizovat skupinu gelů, které disponují v porovnání s běžnými materiály výjimečnými vlastnostmi. Mělo být dosaženo srovnání jednotlivých vlastností vybrané skupiny gelů s ostatními materiály, jako jsou polymery, či kovy.

Gely nabízí široké uplatnění v průmyslu, je ale nutné vědět, na jakou aplikaci se jednotlivé typy gelu hodí. Nelze očekávat, že jeden zástupce gelů bude univerzálním řešením pro libovolné použití. Tak jako se vyskytují různé druhy polymerů, které lze různě modifikovat přísadami, je možné modifikovat i strukturu gelů, čímž se mění i jejich vlastnosti.

Rozhodně je nutné s nimi počítat a lidstvo se s jejich přítomností v životě bude setkávat patrně čím dál, tím častěji.

## 13. Použitá literatura

- [1] Pouchlý Julius: *Fyzikální chemie makromolekulárních a koloidních soustav*. 3. vyd. Praha : VŠCHT Praha, 2008. ISBN 978-80-7080-674-6.
- [2] Bartovská Ludmila, Šišková Marie: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. 5. vyd.. Praha : VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X.
- [3] Gel In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-04-06]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Gel>>.
- [4] SIMPSON, R. Lawrence Livermore National Laboratory [online]. [cit. 2010-04-06]. Explosive Aerogels. Dostupné z WWW: <<https://www.llnl.gov/str/RSimpson.html>>.
- [5] GRASSINO, S.B. *Polymer science learning center [online]*. 2010 [cit. 2010-04-06]. *Properties of Polymers*. Dostupné z WWW: <<http://pslc.ws/mactest/gelsol.htm>>.
- [6] Alemán, J.; a kol. *DEFINITIONS OF TERMS RELATING TO THE STRUCTURE AND PROCESSING OF SOLS, GELS, NETWORKS, AND NORGANIC–ORGANIC HYBRID MATERIALS.*, Pure Appl. Chem. 2007, 79 (10), 1801–1829.
- [7] GRASSINO, S.B.: *Polymer science learning center [online]*. 2010 [cit. 2010-04-06]. Gel: a Short Word With a Long Meaning. Dostupné z WWW: <http://pslc.ws/mactest/gel.htm>
- [8] BARTOVSKÁ, Lidmila; ŠIŠKOVÁ, Marie. *Vydavatelství VŠCHT Praha [online]*. 2005 [cit. 2010-04-06]. Co je co v povrchové a koloidní chemii : výkladový slovník. Dostupné z WWW: <[http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/)>
- [9] Thixotropy In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , [cit. 2010-03-13]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Thixotropy>>.
- [10] Zhao, X.; Huebsch, N.; Mooney, D. J.; Suo, Z.: *Stress-relaxation behavior in gels with ionic and covalent crosslinks*. Journal of Applied Physics 2010, 107 (6).
- [11] Cipelletti, L.; Manley, S.: *Universal Aging Features in the Restructuring of Fractal Colloidal Gels*. Phys. Rev. Lett. 2000, 84 (10), 2275–2278.
- [12] Down Corning Silicone [online]. [cit. 2010-04-07]. Gels Tutorial. Dostupné z WWW: <[http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicsgels/etronics\\_gels\\_tutorial1.asp?wt.svl=OtherRelevantContent\\_EN](http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicsgels/etronics_gels_tutorial1.asp?wt.svl=OtherRelevantContent_EN) >.

- [13] Aspen Aerogels [online]. [cit. 2010-04-07]. Aerogel Morphology Dostupné z WWW: < <http://www.aerogel.com/features/morphology.html>>.
- [14] Aerogel In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , [cit. 2010-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel>>.
- [15] Kistler, S.S.: *Nature*, 1931.
- [16] Teichner S. J.; Nicolaoan, G. A.: *Method of Preparing Inorganic Aerogels*. Patent Spojené Státy Americké 3,672,833; 1972.
- [17] Peri J.B.: *Infrared study of OH and NH<sub>2</sub> groups on the surface of a dry silica aerogel* . J. Phys. Chem. 1966, 70, 2937.
- [18] HUNT, A.; AVERS, M.: *Environmental Energy Technologies*. [online] [cit. 2010-04-06]. DivisionSilica Aerogels Dostupné z WWW: <<http://eetd.lbl.gov/ecs/aerogels/sa-home.html>>.
- [19] Online Materials Information Resource. [online]. [cit. 2010-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.matweb.com>>
- [20] LOCTITE - Těsnění - Lepidla - Tmely. [online]. [cit. 2010-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.loctite.as>>.
- [21] *Technické a bezpečnostní listy výrobců*