TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Vliv spalinových příměsí a plazmatické úpravy na povrchové vlastnosti geopolymerů

Diplomová práce

Studijní program:	N3942 Nanotechnologie
Studijní obor:	Nanomateriály
Autor práce:	**Bc. Vojtěch Růžek**
Vedoucí práce:	prof. Ing. Petr Louda, CSc. Katedra materiálu

Liberec 2020

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Zadání diplomové práce

Vliv spalinových příměsí a plazmatické úpravy na povrchové vlastnosti geopolymerů

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Růžek**
Osobní číslo: M18000184
Studijní program: N3942 Nanotechnologie
Studijní obor: Nanomateriály
Zadávající katedra: Katedra materiálu
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na témata: Plazma a plazmatické úpravy povrchů, povrchová energie, geopolymery.
2. Připravte geopolymerní vzorky podle dodaných podkladů.
3. Proveďte zvolené povrchové úpravy a ověřte jejich vliv na povrchovou energii a nasákavost geopolymeru.
4. Diskutujte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací:	dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy:	40 – 50 stran
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	Čeština

Seznam odborné literatury:

[1] DAVIDOVITS, J. Geopolymers and geopolymeric materials. Therm Anal Calorim, 1989, 35(2), 429-41.

[2] DUXSON, P., et al., Geopolymer technology: the current state of the art, J Mater Sci, 2007, 42, 2917-2933, DOI 10.1007/s10853-006-0637-z

[3] HLAVÁČ, J.: Základy technologie silikátů. Praha: SNTL, 1985.

[4] DUXSON, P., et al., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and

[5] Surfaces A – Physicochem. Eng. Aspects, 2005, 269 (1-3), 47-58, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.

[6] KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry, Miner Eng, 2007, 20, 1261-77.

Vedoucí práce:	prof. Ing. Petr Louda, CSc. Katedra materiálu
Datum zadání práce:	9. října 2019
Předpokládaný termín odevzdání:	18. května 2020

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

Technická univerzita v Liberci
-18-

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 9. října 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. května 2020

Bc. Vojtěch Růžek

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce, prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. za odborné vedení a rady. Také bych rád poděkoval Ing. Totce Bakalové, Ph.D. a Ing. Anně Kavánové z laboratoře tribologie za pomoc při provádění plazmatické úpravy a měření povrchového úhlu. Dále bych rád poděkoval Ing. Vladimíru Kovačičovi a Katarzyně Buczkowské z laboratoře geopolymerů za jejich rady a pomoc při přípravě geopolymerních vzorků.

Velký dík též patří celé mé rodině za podporu nejen při psaní této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem příměsí na formování a povrchové vlastnosti geopolymerů a možnostmi další modifikace povrchových vlastností pomocí plazmatické úpravy či komerčně dostupných laků.

V teoretické části jsou shrnuté poznatky o povrchovém napětí a smáčivosti, geopolymerech a plazmatu, přičemž důraz je kladen na jeho využití k povrchovým úpravám materiálů, především k modifikaci povrchové energie, a to jak pomocí samotného plazmatu, tak dalších povrchových úprav, které je možné podpořit pomocí plazmatické předúpravy.

Experimentální část se zabývá přípravou geopolymerních vzorků s různými příměsemi, konkrétně čedičovými vlákny a spalinami z tepelné elektrárny, či základem (sodným a draselným), jejich povrchovou úpravou pomocí plazmatu či komerčně využívaného laku a následným testováním jejich nasákavosti metodou kontaktního úhlu. Je sledován počáteční kontaktní úhel a následná rychlost vsakování vody. Tyto výsledky jsou následně porovnávány pro zjištění vlivu jednotlivých příměsí či povrchové úpravy na konečné povrchové vlastnosti geopolymeru. Též jsou diskutovány možnosti dalšího výzkumu v oblasti povrchových úprav geopolymerů a jejich zlepšení pomocí plazmatu.

Klíčová slova

Geopolymery, plazmatická úprava, příměsi, povrchové vlastnosti, povrchová úprava

Abstract

The diploma thesis deals with the influence of additives on formation and surface properties of geopolymers and the possibilities of further surface modifications with plasma treatment or commercially available varnishes.

The theoretical part summarizes the knowledge about surface tension and wettability, geopolymers and plasma, with emphasis on its use for surface treatment and modification, especially for modification of surface energy with plasma itself or various surface treatments that can be improved with plasma pretreatment.

In the experimental part, geopolymer samples with various additives, namely basalt fibers and combustion products from a coal power station, and base (sodium and potassium) are prepared and modified with plasma or commercially available varnish, then tested for water absorbality by the contact angle method. The initial contact angle and the water absorption rate are observed. These results are subsequently compared to determine the influence of additives and surface treatment on the surface properties of geopolymer. Options for further research of surface modifications of geopolymers and their improvement with plasma are then discussed.

Keywords

Geopolymers, plasma treatment, additives, surface properties, surface treatment

Obsah

1. Úvod 11
2. Povrchové napětí a energie 12
2.1 Definice 12
2.2 Vznik povrchového napětí 12
2.3 Kapilární jevy 13
2.4 Smáčení povrchu 14
2.5 Adheze a koheze 15
3. Plazma 16
3.1 Definice 16
3.2 Historie plazmatu 17
3.3 Výskyt plazmatu 18
3.4 Charakteristiky plazmatu 19
3.4.1 Stupeň ionizace 19
3.4.2 Teplota 19
3.4.3 Elektrická vodivost 20
3.4.4 Debyeovo stínění 20
3.4.5 Plazmová oscilace 21
3.5 Dělení plazmatu 21
3.5.1 Dělení podle stupně ionizace 21
3.5.2 Dělení podle termodynamické rovnováhy 21
3.5.3 Dělení podle tlaku 21
3.5.4 Dělení podle teploty 22
3.5.4.1 Vysokoteplotní plazma 22
3.5.4.2 Nízkoteplotní plazma 22
3.6 Elementární procesy v plazmatu 23
3.6.1 Ionizace 23
3.6.2 Disociace 24
3.6.3 Rekombinace 24
3.6.4 Excitace 25
3.6.5 Vznik a zánik negativních iontů 25
3.6.6 Iont-molekulové reakce 25
3.7 Generování plazmatu 25
3.7.1 Vysokoteplotní plazma 25
3.7.1.1 Magnetické udržení 25
3.7.1.2 Inerciální udržení 27
3.7.2 Nízkoteplotní plazma 27
3.7.2.1 Nízkotlaké výboje 28
3.7.2.2 Výboje za atmosférického tlaku 29
3.7.2.3 Dielektrický bariérový výboj (Dielectric barrier discharge) 29

3.7.2.4 Piezoelektrický přímý výboj (PDD) ... 31
4. Plazmatická úprava povrchu ... 32
4.1 Čištění povrchu ... 32
4.2 Povrchová aktivace ... 33
4.3 Leptání povrchu ... 34
4.4 Tvorba tenkých vrstev ... 35
4.4.1 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD) ... 36
4.4.2 Plazmatem podporovaná chemická depozice z plynné fáze (PACVD) ... 36
4.4.3 Plazmatická polymerizace ... 37
5. Využití plazmatu k modifikaci povrchové energie ... 38
5.1 Hydrofilní a hydrofobní úpravy ... 39
6. Geopolymery ... 40
6.1 Geopolymerace ... 41
6.2 Struktura geopolymerů ... 41
7. Experimentální část ... 43
7.1 Použité materiály a chemikálie ... 43
7.1.1 Seznam použitých chemikálií a materiálů ... 43
7.1.2 Geopolymer ... 43
7.1.3 Spaliny ... 48
7.2 Zařízení pro plazmatickou úpravu povrchu Piezobrush PZ2 ... 49
7.3 Měření kontaktního úhlu a rychlosti vsakování kapky ... 50
7.4 Experimentální postup ... 50
8 Výsledky měření a diskuze ... 52
8.2 Zhodnocení jednotlivých sad ... 52
8.2.1 – Sada 1 (s čedičovými vlákny), kompaktní ... 52
8.2.1.1 Neupravený povrch ... 52
8.2.1.2 Povrch upravený plazmatem a řez ... 53
8.2.1.3 Vzorky upravené lakem ... 53
8.2.2 – Sada 1 (s čedičovými vlákny), vypěněné. ... 54
8.2.2.1 Neupravený povrch ... 54
8.2.2.2 Povrch upravený plazmatem a řez ... 55
8.2.2.3 Vzorky upravené lakem ... 56
8.2.3 – Sada 2 (bez speciálních přísad), kompaktní ... 56
8.2.3.1 Neupravený povrch ... 56
8.2.3.2 Povrch upravený plazmatem a řez ... 58
8.2.3.3 Vzorky upravené lakem ... 58
8.2.4 – Sada 2 (bez speciálních přísad), vypěněné. ... 59
8.2.4.1 Neupravený povrch ... 59
8.2.4.2 Povrch upravený plazmatem a řez ... 60

8.2.4.3 Vzorky upravené lakem 61
8.2.5 – Sada 3 (s 5% popela), kompaktní 61
8.2.5.1 Neupravený povrch 61
8.2.5.2 Povrch upravený plazmatem a řez 63
8.2.5.3 Vzorky upravené lakem 63
8.2.6 – Sada 3 (s 5% popela), vypěněné 64
8.2.6.1 Neupravený povrch 64
8.2.6.2 Povrch upravený plazmatem a řez 65
8.2.6.3 Vzorky upravené lakem 66
8.2.7 – Sada 4 (s 10% popela), kompaktní 67
8.2.7.1 Neupravený povrch 67
8.2.7.2 Povrch upravený plazmatem a řez 68
8.2.7.3 Vzorky upravené lakem 68
8.2.8 – Sada 4 (s 10% popela), vypěněné 69
8.2.8.1 Neupravený povrch 69
8.2.8.2 Povrch upravený plazmatem a řez 70
8.2.8.3 Vzorky upravené lakem 70
8.2.9 – Sada 5 (draselný Baucis), kompaktní 71
8.2.9.1 Neupravený povrch 71
8.2.9.2 Povrch upravený plazmatem a řez 72
8.2.9.3 Vzorky upravené lakem 73
8.2.10 – Sada 5 (draselný Baucis), vypěněné 74
8.2.10.1 Neupravený povrch 74
8.2.10.2 Povrch upravený plazmatem a řez 74
8.2.10.3 Vzorky upravené lakem 74
8.3 Porovnání sad 75
8.3.1 Vliv čedičových vláken (Sady 1 a 2) 75
8.3.1.1 Kompaktní 75
8.3.1.2 Vypěněné 76
8.3.2 Vliv spalin (Sady 2, 3 a 4) 77
8.3.2.1 Kompaktní 77
8.3.2.2 Vypěněné 78
8.3.3 Vliv Baucisu (Sady 2 a 5) 79
8.3.3.1 Kompaktní 79
8.3.3.2 Vypěněné 80
8.3.4 Počáteční rychlejší vsakování 81
9 Závěr 82
Zdroje 83

1. Úvod

Geopolymery, tedy materiály vznikající anorganickou polykondenzací hlinitokřemičitanů v alkalickém prostředí, jsou velmi perspektivní materiály pro nejrůznější aplikace, například stavebnictví. Předurčují je k tomu výborné mechanické vlastnosti (blízké přírodním kamenům), odolnost vůči teplu, UV záření i dalším vlivům prostředí, energetická nenáročnost výroby a jednoduchá dostupnost surovin k jejich výrobě (hlinitokřemičitany jsou nejběžnější látky v zemské kůře). Též se dají velmi jednoduše tvarovat, neboť se připravují ve formách či pomocí 3D tisku. Jejich nevýhodou je však v současné době cena, neboť jsou dražší než komerčně používané stavební materiály (beton). Také jsou více či méně nasákavé pro vodu, což ztěžuje jejich aplikaci jakožto stavebního materiálu.

Dalším využitím geopolymerů může být depozice nebezpečného odpadu či odpadních komodit, jež vznikají ve velkém množství a není pro ně využití, například spaliny z tepelných elektráren, které by zároveň mohly sloužit jako barvivo, pokud nebudou mít už při nízkých koncentracích negativní vliv na jejich vlastnosti. Díky takovému využití by nebylo nutné tyto odpadní produkty skládkovat a navíc by se snížila cena geopolymerů, neboť často mají zápornou cenu.

Plazma je široce využívané pro zlepšování či úpravu vlastností povrchů, například pro depozici tenkých vrstev či aktivaci povrchů za účelem následných povrchových úprav, například nanášení laků či povrchové funkcionalizace. Využít lze jak plazma vytvářené ze specifického pracovního plynu, tak přímo z atmosféry.

Hlavním cílem této práce je zjistit, zda je možné vytvořit geopolymer s příměsí uhelných spalin, otestovat hydrofobitu/hydrofilii a nasákavost různých druhů geopolymerů a zjistit vliv různých příměsí či použitého základního materiálu, ověřit, zda bude na tyto vlastnosti mít vliv povrchová úprava vzorků pomocí atmosférického plazmatu a pokusit se těmto vzorkům dodat voděodolnost pomocí komerčního laku.

2. Povrchové napětí a energie

2.1 Definice

Povrchové napětí je jev, kdy se povrch kapaliny chová jako tenká pružná vrstva, která se snaží stáhnout povrch kapaliny do útvaru s minimálním povrchem. Při absenci vnějších sil zaujímá kapalina tvar koule. Fyzikálně je definováno jako síla vztažená na jednotku délky myšleného řezu povrchem kapaliny (Rovnice 1) [32][68][69].

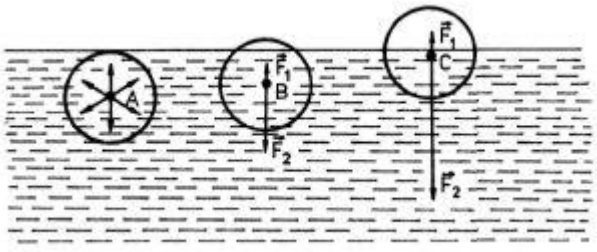
$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \qquad \text{(Rovnice 1)}$$

Povrchová energie – Definována jako energie potřebná ke zvětšení mezifáze o jednotku plochy. Má stejný rozměr a popisuje stejný jev jako povrchové napětí, z fyzikálního hlediska jsou tedy oba pojmy zaměnitelné, nicméně termín „povrchové napětí“ se obvykle využívá pro popis kapalinových mezifází (kapalina s jinou kapalinou nebo plynem), zatímco termín „povrchová energie“ se využívá pro popis mezifází na povrchu pevné látky (tedy systému tvořeného kapalinou, pevnou látkou i plynem), například při popisu smáčení povrchů pevných látek kapalinami [68].

Za nepříliš vysokých tlaků (i za atmosférického) jsou síly, působící ze strany plynné fáze, zanedbatelné ve srovnání se silami působícími ze strany kapaliny, díky čemuž je povrchové napětí nezávislé na vlastnostech plynné fáze, za předpokladu, že plyn nijak nereaguje s kapalinou. Nicméně v případě povrchového napětí mezi kondenzovanými fázemi (dvěma kapalinami) na vlastnostech druhé fáze záleží, na molekuly totiž působí síly z obou stran, což ovlivňuje vlastnosti mezifázového přechodu. Tomuto napětí se říká mezifázové nebo mezipovrchové [68].

2.2 Vznik povrchového napětí

Povrchové napětí je důsledkem nerovnovážného rozložení přitažlivých interakcí mezi molekulami nebo atomy tvořícími povrchovou vrstvu kapaliny. Molekuly uvnitř kapaliny jsou obklopeny primárně jinými molekulami, díky čemuž jsou na ně působící síly rovnoměrné a navzájem se ruší, výsledná síla je tedy nulová. Na mezifázovém rozhraní jsou však molekuly obklopeny molekulami téže fáze pouze z jedné strany, díky čemuž je výsledná síla nenulová a směřuje směrem do kapaliny (Obr. 1), což vede k samovolnému stahování povrchové vrstvy a snaze kapaliny zaujmout co nejmenší povrch [68].



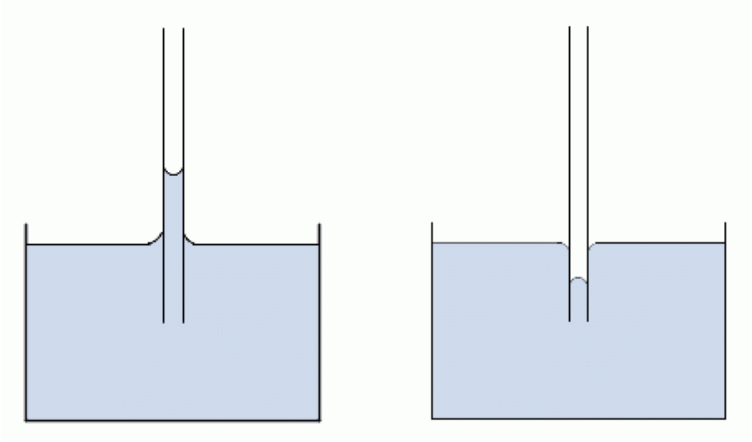
Obr. 1 *– Síly působící na částice v kapalině [67]*

2.3 Kapilární jevy

Kapiláry jsou trubice s velmi malým průměrem (řádově mm). Při jejich částečném ponoření do kapaliny dochází k zakřivení volného povrchu kapaliny v závislosti na vzájemné interakci mezi materiálem kapiláry a kapalinou. Pokud je povrch kapiláry smáčen, dochází ke kapilární elevaci. Pokud smáčen není, dochází ke kapilární depresi [70].

Kapilární elevace – Kapalina v kapiláře vystupuje nad hladinu v nádobě a vytváří v ní dutý povrch. Čím nižší je povrchové napětí kapaliny, tím je kapilární elevace výraznější. Je velmi důležitá pro přírodu, neboť v jejím důsledku dochází například ke vzlínání vody v půdě. Není nutné, aby kapilární soustava byla uzavřená, jako je například kapilára v podobě skleněné trubice, proto ke kapilární elevaci a následnému vzlínání dochází i v textiliích a jiných porézních materiálech [68] [70].

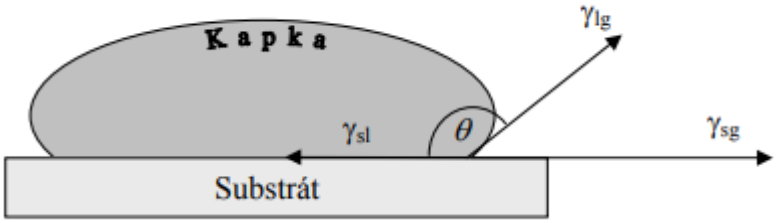
Kapilární deprese – Kapalina v kapiláře klesá pod úroveň hladiny a její povrch je vypouklý. Projevuje se u kapalin s vysokým povrchovým napětím (například u rtuti, která nesmáčí většinu látek) [70].



Obr. 2 *– Kapilární elevace (vlevo) a kapilární deprese [68]*

2.4 Smáčení povrchu

Dynamický proces na mezifázovém rozhraní pevná látka – kapalina – plyn. Jedná se o migraci kapaliny na povrchu pevné látky a dosažení termodynamické rovnováhy. Závisí na mezimolekulárních silách kapaliny i pevné látky, přičemž nejochotněji smáčí povrch takové kapaliny, které mají podobné mezimolekulární síly jako daná pevná látka, případně i podobné složení (například voda dobře smáčí led). Smáčivost je také ovlivněna povrchem pevné látky. Řídí se Younghovou rovnicí (Rovnice 2) [68] a obvykle se popisuje pomocí kontaktního úhlu, který svírá kapka s rovinou povrchu. Tento úhel se obvykle měří pomocí kapkové metody.



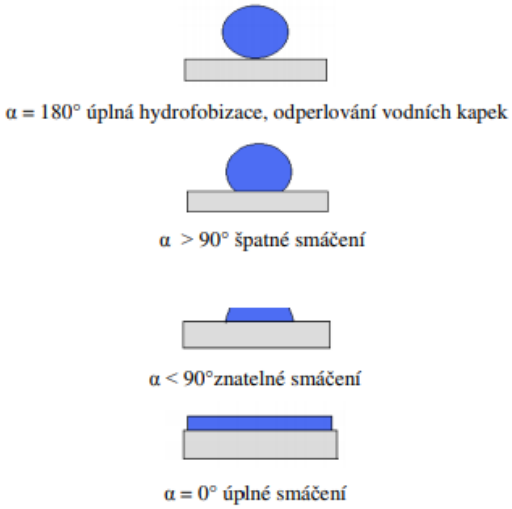
Obr. 3 *– Rozhraní fází [68]*

$$\gamma_{sl} - \gamma_{sg} = \gamma_{lg} cos\theta \qquad \text{(Rovnice 2)}$$

Kde γ_{ls} označuje napětí mezi kapalinou a pevnou látkou, γ_{lg} napětí mezi vzduchem a kapalinou, γ_{sg} napětí mezi pevnou látkou a vzduchem a θ kontaktní úhel, neboli úhel smáčení [68].

Složky γ_{lg} *a* γ_{sg} se snaží kapku roztáhnout a smočit s ní povrch, zatímco γ_{ls} kapku stahuje do koule. Pokud nedojde k vsáknutí kapky do povrchu, nakonec se ustanoví rovnováha, kdy je výsledná síla nulová a kapka tak zůstává v rovnováze [68].

Kapková metoda – Nejčastější a nejjednodušší metoda využívaná pro měření povrchové energie na rozhraní mezi pevnou látkou a kapalinou. Provádí se prostým nanesením kapky kapaliny na povrch pevné látky a následným změřením kontaktního úhlu. Úhel se měří různými metodami (Například metodou tečen nebo pomocí laserového paprsku) [72]. Obvykle se udává, že pokud je úhel smáčení vyšší než 90°, látka smáčí povrch špatně, zatímco při nižších úhlech smáčí povrch dobře. Při úhlu vyšším než 150° je povrch považován za superhydrofobní (obvykle se k měření používá voda), zatímco pokud se kapka vůbec neobjeví (tedy úhel 0°), dochází k úplnému smáčení [32][71][72].



Obr. 4 *– Tvary kapek při úhlech smáčení [32]*

2.5 Adheze a koheze

Termín adheze (přilnavost) má několik významů v závislosti na oboru, ve kterém je používán. Ve fyzikální chemii se jedná o přitažlivost mezi pevným povrchem a druhou fází, kterou mohou být pevné částečky, molekuly, kapičky, prášek nebo souvislý film. Adheze vede k absorpci, tedy zachytávání druhé fáze uvnitř pevné látky, či k adsorpci, tedy zachytávání druhé fáze na povrchu pevné látky. Příčinou adheze jsou fyzikální (elektrostatické a Van der Waalsovy) síly a chemické vazby (chemisorpce – druhá fáze se na povrch naváže chemickou vazbou). Tato fyzikálně chemická definice je patrně nejdůležitější, dále se pojem adheze používá v technologii lepení, kdy jde o přitažlivost mezi pevným povrchem a druhou kapalinou či pevnou fází, v magnetismu, kde označuje přitažlivost v důsledku silového pole, a v dopravním inženýrství, kde je tak označováno valivé tření vznikající při dotyku kola s podkladem [99].

Koheze (soudržnost), označuje souhrn všech přitažlivých sil, které brání oddálení molekul od sebe. Její velikost udává tzv. kohezní energie, která udává energii, kterou je nutné vynaložit k oddělení molekul od sebe [99][100].

Pokud je při styku kapaliny s pevným povrchem adheze kapaliny k povrchu silnější než koheze jejích molekul, dochází k smáčení. Pokud je koheze mezi molekulami vyšší, povrch není smáčen [100].

3. Plazma

3.1 Definice

Plazma je plynná směs delokalizovaných elektronů a kladných iontů (obecně částic s opačným nábojem), spolu s neutrálními atomy nebo molekulami (pokud není plazma plně ionizované). Ke vzniku plazmatu dochází při vystavení plynu vysokoenergetickému záření, elektrickému poli nebo dostatečně vysoké teplotě. Energie částic v plynu se v důsledku zvýší na úroveň dostatečnou pro jejich ionizaci [2]. Při dalším zvyšování teplot může dojít k rozpadu jader či dokonce samotných protonů a neutronů za vzniku kvark-gluonového plazmatu [27]. Vykazuje kvazineutralitu a kolektivní chování.

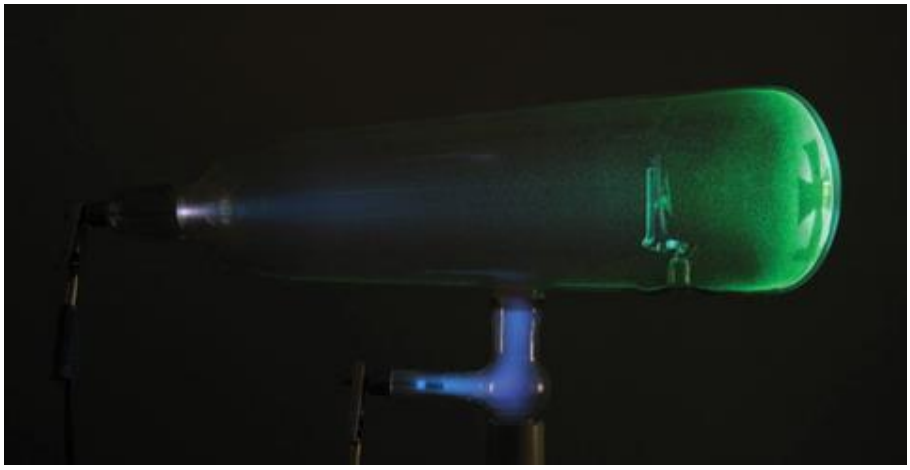
Kvazineutralita je jev, při kterém má elektrony tvořený záporný náboj stejnou velikost, jako ionty tvořený kladný náboj, a z vnějšího pohledu má těleso tvořené plazmatem celkový náboj rovný nule. Díky přítomnosti volných elektronů (nosičů náboje) je však plazma vynikajícím elektrickým vodičem [3].

Ke kolektivnímu chování dochází díky přítomnosti nabitých částic. Pokud je plyn složen pouze z neutrálních částic, mohou se tyto částice navzájem ovlivňovat pouze vzájemnými srážkami, neboť gravitační působení je tak malé, že může být zanedbáno. Pokud jsou však částice nabité, mohou se ovlivňovat i na dálku na základě Coulombova zákona [4]. Elektrická pole, která tyto částice tvoří, působí na ostatní nabité částice až do vzdálenosti Debyeovy stínící délky. Pohyb v plazmatu tedy nezávisí pouze na lokálních podmínkách, ale také na stavu plazmatu v jiných oblastech tělesa jím tvořeného. Tomuto jevu se říká kolektivní chování [5].

Obr. 5 *– Plazma v plazmové komoře [1]*

3.2 Historie plazmatu

Takzvané „čtvrté skupenství hmoty“ objevil v roce 1879 anglický výzkumník Sir William Crookes [12] pomocí zařízení dnes známého jako katodová (Crookesova) trubice, též označována jako maltézský kříž, díky charakteristickému tvaru stínítka. V dřívějších experimentech již bylo pozorováno, že při aplikaci vysokého napětí mezi elektrody v nízkém vakuu dojde ke vzniku záře uvnitř trubic, tento jev byl připisován „katodovým paprskům“, nicméně Crookes měl pro svoje experimenty nové vývěvy schopné dosáhnout vyššího vakua. Konkrétně šlo o několik Sprengelových vývěv [7] zapojených paralelně. Pozoroval vznik tmavého prostoru, který se při vyšším vakuu rozšiřoval až k anodě (tento prostor je též pojmenován po něm). Ze skla za katodou poté vycházela záře a byl na ní viditelný stín ve tvaru stínítka [6].



Obr. 6 *– Crookesova Trubice [7]*

Tento jev se Crookes pokusil vysvětlit zavedením dalšího skupenství hmoty, na který podle něj přecházel vzduch a jiné plyny při silném zředění. Toto nové skupenství považoval za důsledek vibrací molekul plynu, jejichž amplituda se při dostatečné nízkém tlaku zvětší natolik, že se stane srovnatelnou s prostorem, ve kterém se nachází. V přítomnosti elektrického výboje se pak částice pohybují stejným směrem a při nárazech do stěny trubice dochází k jejímu rozvibrování a vytvoření dočasného zdroje záření, který trvá, dokud systémem provází proud dodávající částicím dostatečnou energii, aby vytvořily zdání trvající záře. Toto „skupenství“ Crookes z tohoto důvodu nazval „Zářivou hmotou“ (anglicky „Radiant Matter“) [8][13].

Tento popis je nesprávný, nicméně Crookes v té době ještě neměl k dispozici znalost existence elektronu, atom byl stále považován za nedělitelný objekt a zářivou hmotu tedy nebylo možné popsat jako ionizovaný plyn. V roce 1897 objevil anglický fyzik Joseph John Thompson [11], že „katodové paprsky“ je možné ohýbat pomocí elektrického nebo magnetického pole, z čehož odvodil, že částice, které záření tvoří, musí mít záporný náboj a být

nezávislé na plynu nebo elektrodách. Těmito částicemi jsou právě elektrony. Po tomto objevu mohla být popsána skutečná podstata plazmatu jakožto ionizovaného plynu [9].

Samotný výraz plazma pochází ze starořeckého „*πλάσμα*“, což v překladu znamená „vytvarovaná hmota“ nebo taky „želé“ [14]. Takto bylo plazma poprvé pojmenováno americkým vědcem Irvingem Langmuirem [15], který tento termín údajně použil proto, že v plazmatu dochází k pohybu molekul, iontů a nečistot podobně, jako se v krevní plazmě pohybují červené a bílé krvinky. S touto informací přišel Langmuirův spolupracovník Harold M. Mott-Smith v dopise svému příteli pracujícímu v General Electric Research and Development Center v roce 1967. Tento dopis byl v roce 1971 zveřejněn v časopisu Nature [16]. Podle knihy Introduction to Plasma physics [17] je též možné, že mu plazma ve skleněných vakuových komorách připomínalo barevnou želatinu ve formě.

3.3 Výskyt plazmatu

Plazma tvoří drtivou většinu hmoty ve známém vesmíru. Obvykle se udává více než 99,9% [18]. Tato převaha je způsobena tím, že se z něj skládají hvězdy, ve kterých plazma vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků vyvolaných gravitační silou samotné hmoty hvězdy, přičemž následná fúze vyrovnává působení gravitace a umožňuje hvězdě uvolňovat energii ve formě záření. Tomuto jevu se říká hydrostatická (nebo gravitační) rovnováha [19]. Bez fúze by se hvězda zhroutila sama do sebe za vzniku černé díry nebo neutronové hvězdy. V plazmatickém stavu je také hmota v meziplanetárním, mezihvězdném i mezigalaktickém prostoru, byť jí je velmi málo, neboť v tomto prostoru je velmi vysoké (kosmické) vakuum. Tyto částice jsou většinou pozůstatky slunečního větru, tedy proudu nabitých částic, který uvolňují hvězdy [20].

Na Zemi se plazma vyskytuje v mnohem menší míře, kvůli nižším teplotám. Přirozeně se vyskytuje v blescích, polární záři a v ionosféře. Někdy bývá za plazma označován i pouhý oheň, nicméně u toho záleží na teplotě, která určuje, jak velká část jeho hmoty je ionizována [24], neboť velmi slabě ionizované plyny nevykazují kolektivní chování.

Blesk – Náhlý elektrostatický výboj vyvolaný rozdílným elektrickým potenciálem v atmosféře, případně mezi atmosférou a zemí. Trvá velmi krátkou chvíli a plazma je produkováno proudem elektronů, který výrazně zvýší teplotu ve svém bezprostředním okolí [22].

Polární záře – Objevuje se v blízkosti polárního kruhu. Vzniká v případě, že magnetické pole země přitáhne částice slunečního větru do horních vrstev atmosféry, kde interagují se vzduchem za uvolnění světla a elektrické energie, která může narušovat funkci elektronických

zařízení. Interakce s kyslíkem produkuje zelenožluté a červené světlo, interakce s dusíkem zase modré a fialové [23]. Dělí se na severní (Aurora Borealis) a na jižní (Aurora Australis).

Ionosféra – V Ionosféře dochází vlivem interakce se slunečním UV zářením k její částečné ionizaci. Důsledkem je například specifický druh rozptylu světla, takzvaný Thompsonův rozptyl [25].

Obr. 7 *– Aurora Borealis [26]*

3.4 Charakteristiky plazmatu

3.4.1 Stupeň ionizace

Stupeň ionizace označuje poměr počtu ionizovaných částic proti celkovému počtu částic, jde tedy o bezrozměrnou veličinu. Závisí především na teplotě.

Stupeň ionizace lze popsat pomocí Sahovy rovnice (rovnice 3) [29] [30], která jej popisuje na základě kinetické energie částic způsobené zvýšenou teplotou, jež vede k častějším srážkám a tedy vyšší ionizaci. Používá se pro plyny.

$$\frac{P_+^2}{1-P_+} = CT^{3/2}\exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right) \qquad \text{(Rovnice 3)}$$

Kde $C \sim 2{,}4 \cdot 10^{21}$, P_+ je stupeň ionizace, U_i ionizační potenciál, T termodynamická teplota plazmatu a k Boltzmannova konstanta [29].

3.4.2 Teplota

Teplota je veličina související s chaotickým (tepelným) pohybem částic. V plazmatu však mohou mít elektrony jinou teplotu než ionty nebo neutrální částice. Měří se v Kelvinech nebo v elektronvoltech. Souvisí se stupněm ionizace (viz. Sahova rovnice) [31].

3.4.3 Elektrická vodivost

Plazma je dobrý vodič elektřiny, z důvodu přítomnosti volných nábojů. Též reaguje na silné magnetické pole. Díky dobré elektrické vodivosti a elektromagnetickým silám obvykle dochází k vyrovnání hustoty kladných a záporných nábojů v celém objemu plazmatu, důsledkem čehož je kvazineutralita [32].

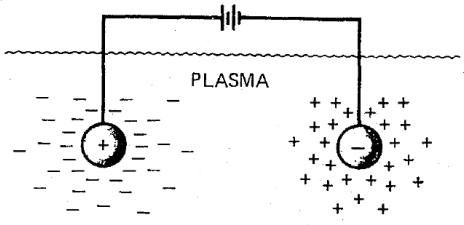
3.4.4 Debyeovo stínění

Plazma má dostatečnou hustotu elektricky nabitých částic, aby elektromagnetické interakce převládaly nad srážkami neutrálních částic. Díky tomu je schopné odstínit vnější elektrická pole utvořením vlastních prostorových nábojů, které působí proti vnějšímu poli a ruší tak jeho působení. Pokud je do plazmatu vložen cizí elektrický náboj (například kus pevné látky připojený na zdroj napětí), vznikne okolo něj stínící náboj z částic, které mají opačný elektrický náboj (Obr. 4) Tloušťka této vrstvy se zvyšuje s kinetickou energií částic (tedy teplotou). Elektrické pole vloženého náboje je s rostoucí vzdáleností postupně oslabováno až k nule [33]. Stínící schopnost plazmatu se vyjadřuje pomocí veličiny zvané Debyeova stínící délka (rovnice 2).

Debyeova stínící délka – Vzdálenost, ve které odstíněním klesne potenciál elektrického pole v plazmatu oproti potenciálu elektrického pole ve vakuu na 1/e [35]. Platí, že se zvyšující se koncentrací nabitých částic klesá, neboť více nosičů náboje může efektivněji stínit vložený náboj [33]. Na vzdálenosti vyšší než Debyeova délka se už neuvažuje působení elektrického pole a plazma se opět chová kvazineutrálně. Stínění se projevuje pouze, pokud je velikost celého systému aspoň řádově větší než Debyeova délka a pokud je v něm dostatek ionizovaných částic. Výpočet této délky je uveden v rovnici 4.

$$h = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k}{e^2 n_0} \cdot \frac{T_+ T_-}{T_+ + T_-}} \qquad \text{(Rovnice 4)}$$

Kde T_+ a T_- jsou teploty iontů, n_0 koncentrace nabitých částic, ε_0 permitivita vakua, e elementární náboj elektronu a k Boltzmannova konstanta [35].



Obr. 8 *– Stínící vrstva kolem nábojů vložených do plazmatu [34]*

3.4.5 Plazmová oscilace

Vzhledem k tomu, že ionty jsou mnohem těžší než elektrony, v plazmatu oscilují především elektrony, které kmitají kolem „nehybných“ iontů s frekvencí danou jejich koncentrací v plazmatu. Vyšší koncentrace elektronů znamená vyšší frekvenci, protože s vyšším počtem elektronů se zvyšuje síla působící mezi nimi a nabitými ionty [36]. Vznikajícím vlnám se též říká Langmuirovy vlny, podle jejich objevitele, Irvinga Langmuira [37]. Vztah mezi frekvencí a koncentrací elektronů vyjadřuje rovnice 5.

$$\omega_{pl} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m\varepsilon_0}} \qquad \text{(Rovnice 5)}$$

Kde ω_{pl} označuje plazmovou frekvenci, n_e koncentraci elektronů, m hmotnost elektronu, e elementární náboj a ε_0 permitivitu vakua [30][36].

3.5 Dělení plazmatu

Plazma se obvykle dělí podle stupně ionizace nebo podle teploty. Platí, že stupeň ionizace závisí na teplotě, nicméně je ovlivňován i jinými faktory, například ionizační energií plynů tvořících plazma [38]. Dále jej lze dělit například podle termodynamické rovnováhy či tlaku [32].

3.5.1 Dělení podle stupně ionizace

Podle této veličiny se plazma dělí na slabě ionizované, kde je koncentrace nabitých částic nízká oproti koncentraci neutrálních částic a které může dokonce existovat i za pokojové teploty, silně ionizované plazma, kde převládají nabité částice, a plně ionizované plazma, ve kterém jsou ionizovány všechny částice [28].

3.5.2 Dělení podle termodynamické rovnováhy

Pokud je plazma v termodynamické rovnováze (izotermní), mají všechny jeho částice stejnou teplotu. V neizotermním plazmatu se teploty částic liší, obvykle jsou elektrony mnohem teplejší než ionty [41].

3.5.3 Dělení podle tlaku

Podle tlaku se plazma dělí na nízkotlaké, které vzniká za sníženého tlaku a ve kterém mají částice vyšší volnou dráhu letu v důsledku malé hustoty výskytu částic a méně častých srážek, a na vysokotlaké, ve kterém mají částice menší volnou dráhou letu a častější srážky. Za speciální případ může být považováno atmosférické plazma, které označuje plazma existující za atmosférického tlaku, přičemž se tak označuje jak plazma vznikající v samotné atmosféře, tak plazma tvořené jiným plynem nebo směsí plynů [39][40].

3.5.4 Dělení podle teploty

Podle teploty se plazma dělí na vysokoteplotní a na nízkoteplotní, jež se dále dělí na horké a studené.

3.5.4.1 Vysokoteplotní plazma

Ve vysokoteplotním plazmatu je teplota vyšší než 10^6 K. Z toho důvodu se vyznačuje vysokým stupněm ionizace a bývá izotermní [42]. V této formě se ve vesmíru vyskytuje většina plazmatu a tedy i většina hmoty, neboť jím jsou tvořeny hvězdy. Na Zemi jej lze vytvořit jaderným výbuchem či v experimentálních zařízeních pro jadernou fúzi (například tokamaky či zařízení s inerciálním udržením) [24].

Zvyšování teploty může dále výrazně měnit vlastnosti i složení plazmatu, které se z toho důvodu dále dělí.

Běžné plazma – Plazma s částečně ionizovanými molekulami, část elektronů je vázána jádry atomů, zbytek je tvořen volnými elektrony, jež jsou zodpovědné za plazmatické vlastnosti tělesa [43].

Termonukleární plazma – Atomy látky jsou zcela ionizované a plazma je tvořeno volnými elektrony a jádry atomů bez elektronového obalu. V tomto stavu existuje plazma v jádrech hvězd, kde probíhá termojaderná fúze [43].

Nukleonové plazma – Dochází k rozpadu jader atomů. Tento druh plazmatu je směsicí elektronů, protonů a neutronů. V tomto stavu podle odhadů existovala hmota v čase 10 mikrosekund po velkém třesku, když vznikaly první protony a neutrony. Též vzniká ve vnějších obalech explodujících supernov při stlačení plynů rázovou vlnou, přičemž z něj následně vznikají těžké prvky [43].

Kvark-gluonové plazma – Dochází k rozpadu nukleonů (protonů a neutronů). Plazma je tvořeno kvarky (subatomární částice tvořící nukleony), a gluony, částicemi zprostředkovávajícími silnou jadernou interakci, která drží pohromadě jádra atomů. V tomto stavu byla hmota několik miliontin sekundy po velkém třesku. Pro vytvoření tohoto druhu plazmatu se používají urychlovače částic, kterými se vyvolávají srážky těžkých iontů (zlata nebo olova) urychlených na energii v řádu bilionů elektronvoltů. Tohoto stavu hmoty bylo poprvé uměle dosaženo v CERNu v roce 2000 [27][43].

3.5.4.2 Nízkoteplotní plazma

Plazma s teplotou nižší než 10^6K, vyskytuje se na zemi v přírodě (blesky, polární záře) i v technických výtvorech (zářivky, elektrické oblouky). Dále se dělí na horké a studené plazma [32]. Vzniká obvykle během výbojů v plynech.

Horké plazma – Připravuje se za vysokých tlaků pomocí elektrického proudu, rádiových frekvencí či mikrovlnného záření. Elektrony mají podobnou teplotu jako ionty. Používá se například pro naprašování či likvidaci toxinů a jiných nebezpečných látek [45]. Také jej je možné použít na likvidaci odpadů za vzniku plynu s podobným složením, jako má svítiplyn, který je možné využít jako zdroj energie [44].

Studené plazma – Obvykle generováno za nízkých tlaků pomocí elektrického proudu či mikrovlnného záření, nicméně jej lze generovat i přímo v atmosféře. Teplota elektronů výrazně převyšuje teplotu iontů, která je stejná jako teplota neutrálního plynu. Vzhledem k nízké teplotě lze tento druh plazmatu používat k úpravě povrchů (topografické změny, roubování) prakticky všech látek, včetně těch organických [44]. Dokonce jej lze aplikovat i na živou tkáň (Obr. 5), například pro dezinfekci ran a podporu jejich léčení či pro léčbu některých druhů rakoviny [46][47].

Obr.9 *– Aplikace studeného plazmatu na živou tkáň [48]*

3.6 Elementární procesy v plazmatu

Složky plazmatu (ionty, elektrony a neutrální částice) mezi sebou interagují, přičemž tyto interakce se dají rozdělit na ionizaci, disociaci a rekombinaci molekul, excitaci, vznik a zánik negativních iontů a iont-molekulové reakce [49].

3.6.1 Ionizace

Patrně nejdůležitější proces, neboť plazma je definováno jako ionizovaný plyn. Ionizovaný atom ztrácí elektron za vzniku kladného či záporného iontu. Pro ionizaci je nutné dodat elektronu dostatek energie, aby byla překonána jeho vazebná (ionizační energie) a mohl se odpojit od svého atomu. Pokud se elektron opět vrátí do atomového obalu, tato energie se uvolní ve formě fotonu [50]. Ionizace může být označena za fázový přechod z plynu na plazma, pokud převáží nad rekombinací.

Existuje několik druhů ionizace: Ionizace nárazem (elektronem či molekulou), pozitivním iontem, fotonem a termická ionizace [32][49].

Ionizace elektronem – Probíhá v důsledku nárazu elektronu s dostatečnou kinetickou energií. Může molekulu nejen ionizovat, ale i excitovat nebo rozbít. Tento děj má obtížně měřitelnou závislost na energii [49].

Ionizace molekulou – Molekula s dostatečnou kinetickou energií může ionizovat jinou molekulu. Pravděpodobnost ionizace se zvyšuje, pokud je v excitovaném nebo metastabilním stavu, neboť v takovém případě může dojít ke snadnějšímu přenosu energie. Ionizaci pomocí excitované molekuly se říká Penningova ionizace [49].

Ionizace pozitivním iontem – Některé pozitivní ionty, například H_3^+, ochotně předávají proton jiným molekulám, čímž je přemění na iont [49].

Ionizace fotonem – Také nazývána fotoionizace. Nejjednodušším příkladem fotoionizace je fotoelektrický jev, při kterém se molekula ionizuje v důsledku absorpce fotonu elektronem. Tento foton musí mít energii vyšší než je ionizační energie, případný přebytek je přeměněn na kinetickou energii elektronu. Nicméně ionizace může proběhnout i díky narušení kovalentních vazeb a rozbití molekuly za vzniku kladného a záporného iontu [51].

Termická ionizace – Obsazení energetických hladin v molekulách má pravděpodobnostní charakter (Fermi-Diracovo rozdělení) a je závislé na teplotě. Pravděpodobnost samovolné ionizace, a tedy i podíl ionizovaných částic, se zvyšuje se zvyšující se teplotou [49].

3.6.2 Disociace

Děj, při kterém se molekuly rozdělují (disociují) na menší objekty. V plazmatu k disociaci dochází například v důsledku nárazu elektronu, přičemž disociace může být zároveň i ionizací, neboť mohou vznikat ionty. Kromě nich mohou ale vznikat i radikály, vysoce reaktivní částice s nepárovým elektronem, které pak ochotně reagují s jinými látkami, aby se staly opět stabilními [52].

3.6.3 Rekombinace

Opačný děj k disociaci a ionizaci, tedy opětovné spojení rozdělených částic za vzniku stabilní molekuly. V plazmatu se jedná především o spojení elektronů a kladných iontů, nicméně může se jednat i o spojení kladného a záporného iontu či dvou radikálů [49][52]. Rekombinace může být označena za fázový přechod z plazmatu na plyn, pokud převáží nad ionizací.

3.6.4 Excitace

Elektrony se okolo jádra nacházejí na energetických orbitalech. Pokud je těmto elektronům dodáno určité množství energie (ve formě záření, tepla apod.), může jeden nebo více elektronů přestoupit na vyšší orbital. Atom tím vstoupí do excitovaného stavu. Tento stav trvá jen krátkou chvíli a elektrony se rychle vracejí na svou původní hladinu za současného vyzáření přebytečné energie ve formě fotonu o specifické vlnové délce [96].

3.6.5 Vznik a zánik negativních iontů

Energetická bilance záporného iontu (tedy atomu s elektrony navíc) je výhodnější než energetická bilance neutrálního atomu, a tak jich většina může tvořit záporné ionty. Energie, která se uvolní při přijetí elektronu a kterou je nutné dodat pro rozbití záporného iontu, se nazývá elektronová afinita. Rozbít záporný iont je možné například pomocí „vyražení“ přebytečného elektronu fotonem (photodetachment) [49] [53].

3.6.6 Iont-molekulové reakce

Reakce, kterých se účastní ionty i neutrální molekuly. Velká samostatná kapitola procesů v plazmatu. Popisují se hlavně podle rychlostní konstanty. Dělí se na unimolekulární, kdy dochází ke změnám v rámci jedné molekuly, binární, kdy do reakce vstupují dvě molekuly, a ternární, kdy do reakce vstupují dvě molekuly plus jedna jako katalyzátor [49].

3.7 Generování plazmatu

3.7.1 Vysokoteplotní plazma

Vytvoření vysokoteplotního plazmatu je zdánlivě triviální proces, stačí zahřát pracovní plyn na dostatečně vysokou teplotu (kolem 10^6K), nicméně takto vysoká teplota znemožňuje zadržení plazmatu většinou obvyklých metod, neboť ji žádný pevný materiál nevydrží a při takové teplotě se sám změní na vysokoteplotní plazma. Pro srovnání, nejvyšší bod tání mezi slitinami má teoretická slitina hafnia, uhlíku a dusíku, a to 4126 °C [54].

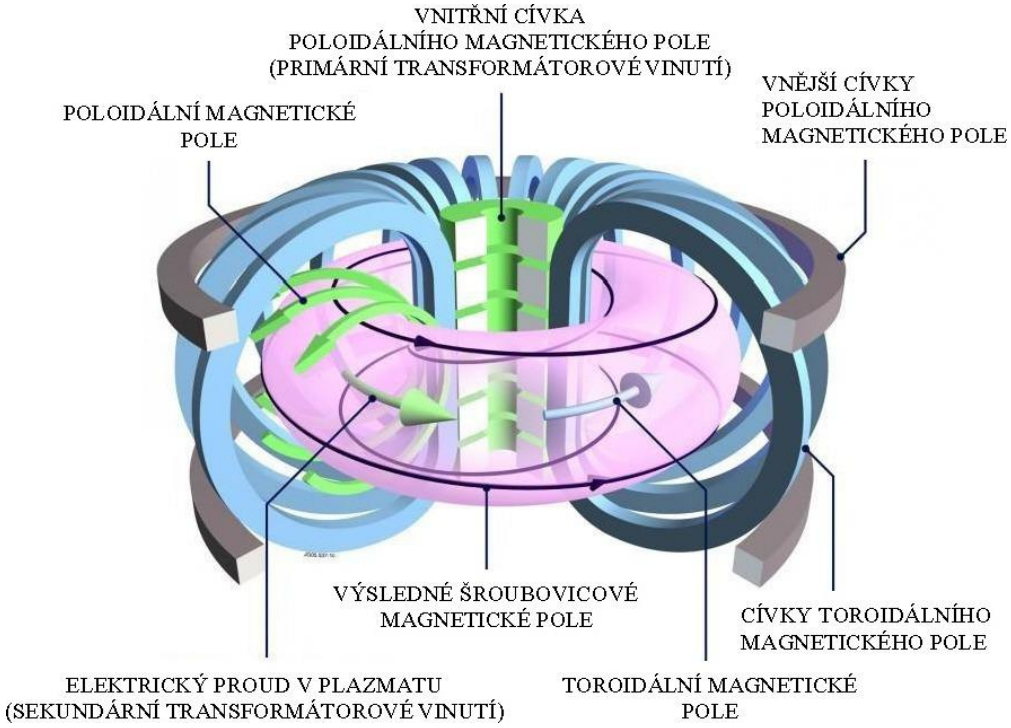
Z těchto důvodů je nutné pro udržení vysokoteplotního plazmatu použít takovou metodu, která zabrání styku plazmatu a stěn nádoby. Nejčastějšími metodami, které jsou v současné době zkoumány, je magnetické a inerciální udržení, a to především pro využití vysokoteplotního plazmatu k provádění jaderné fúze a zisku energie [55].

3.7.1.1 Magnetické udržení

Pro udržení plazmatu je využíváno silné magnetické pole. V systémech s tímto druhem udržení je malá hustota částic. První systémy využívaly pouze lineární zařízení (pinče, magnetická zrcadla), nicméně v nich docházelo k vysokým ztrátám a byly nahrazeny zařízeními

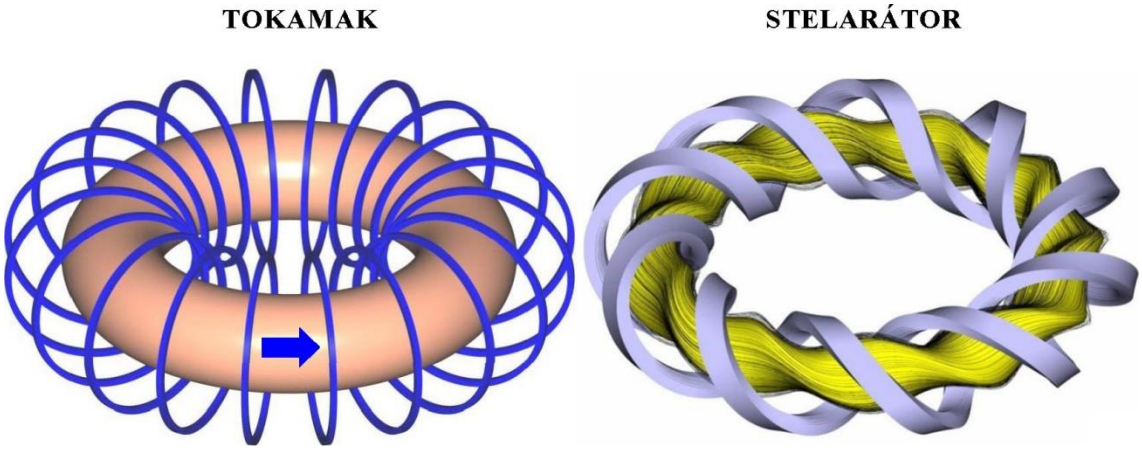
ve tvaru toroidu. Díky nestabilitě muselo být přidáno dodatečné magnetické pole. Podle způsobu, jakým bylo přidáno, se rozlišují dva toroidální systémy, tokamaky a stelarátory [56].

Tokamak – Pro udržení plazmatu využívá vnější cívky a elektrický proud vybuzený v samotném plazmatu. Přivedením proudových impulzů na primární vinutí se elektromagnetickou indukcí vybudí proud v slabě ionizovaném plynu, který se díky vysokému odporu velmi rychle zahřívá na teplotu potřebnou k vytvoření vysokoteplotního plazmatu. Samotný ohmický ohřev nestačí, proto bývá plazma dodatečně zahříváno. Konkrétně ohřevem neutrálními svazky (urychlenými částicemi, které jsou před vstupem do tokamaku zpětně neutralizovány) a mikrovlnami o vhodné vlnové délce. Plazma je pak udržováno od stěn nádoby pomocí toroidálního a poloidálního pole, které dohromady vytvářejí pole ve tvaru šroubovice a Lorentzovou silou udržují plazma ve středu komory [56].



Obr. 10 *– Základní schéma reaktoru typu tokamak [57]*

Stelarátor – Na rozdíl od tokamaku v něm neteče proud v plazmatu, částice jsou udržovány pouze pomocí pole vytvářeného vnějšími cívkami. Největším rozdílem oproti tokamaku je záměrně zkroucená geometrie komory a složitější systém cívek [56].



Obr. 11 *– Porovnání tvaru cívek (modrá a šedá) v tokamaku a stelarátoru [57]*

3.7.1.2 Inerciální udržení

Tento druh tvorby plazmatu je v podstatě rychlá série miniaturních termonukleárních explozí se silou dostatečně nízkou, aby je bylo možné provádět bezpečně. V systémech s tímto druhem udržení je vysoká hustota částic a velmi krátká doba udržení (řádově 10^{-10} sekund). Principem této metody je, aby celá reakce proběhla rychleji, než se plazma rozletí do okolního prostoru [56].

Vysokoteplotní plazma je vytvářeno rychlým stlačením terčíku paliva (pellety) pomocí laserů, přičemž terčík je obvykle tvořen dutou kuličkou naplněnou směsí deuteria a tritia (těžkých izotopů vodíku) [58]. Lasery z povrchu terčíku odpaří jisté množství materiálu a vyvolají rázovou vlnu směřující dovnitř, která terčík stlačí a zvýší v něm teplotu i tlak dostatečně na přeměnu hmoty na plazma a následnou jadernou fúzi. K zajištění rovnoměrného stlačení terčíku je nutné používat mnoho laserových svazků [56].

3.7.2 Nízkoteplotní plazma

Nejběžněji využívanou metodou pro generování a udržování nízkoteplotního plazmatu je aplikace elektrického pole na těleso tvořené neutrálním plynem. Využívá se toho, že neutrální plyny obsahují malé množství ionizovaných molekul a elektronů, například v důsledku interakce s vysokoenergetickým zářením nebo samovolné ionizace. Urychlení těchto částic vede k jejich srážkám s ostatními molekulami, což vyvolá jejich ionizaci a vznik dalších nabitých částic. Stupeň ionizace plynu se tak zvyšuje až do doby, než se vyrovná ionizace s rekombinací a vznikne stabilní plazma. Pro udržení takového plazmatu je nutná kontinuální dodávka energie, neboť dochází k jejímu rychlému vyzařování. Dále je možné tento druh plazmatu generovat zahřátím plynu na dostatečně vysokou teplotu (horké plazma) [59].

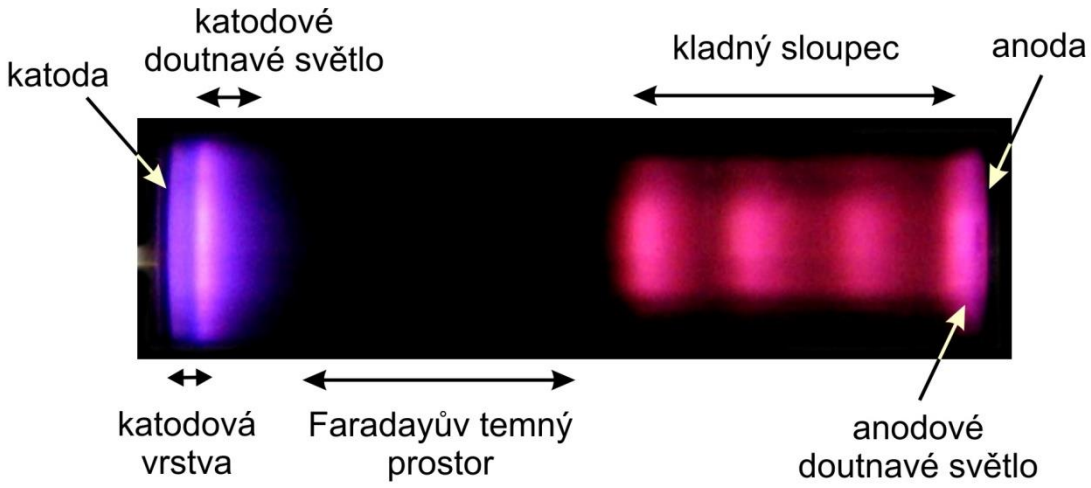
3.7.2.1 Nízkotlaké výboje

Tyto výboje jsou vyvolávány a udržovány pomocí vysokofrekvenčních elektromagnetických polí, která se dělí podle používaných frekvencí. Velkou nevýhodou je mnohem vyšší cena jak za vakuové zařízení, tak za vytváření vakua, navíc není možný kontinuální provoz při využití na úpravu výrobků, neboť je možné je opracovávat jen po určitých dávkách [32][59], což dále zvyšuje cenu za provoz. Nejčastěji se používají výboje radiofrekvenční a mikrovlnné.

Radiofrekvenční výboj – Většinou využívá frekvence od 1 – 100MHz, což odpovídá rádiovým vlnám. Může operovat s izolujícími materiály díky měnící se polaritě a také pracovat v bezelektrodovém uspořádání, kdy jsou elektrody umístěné vně nádoby. Dělí se na kapacitně vázaný výboj a na induktivně vázaný výboj [24][59].

Mikrovlnný výboj – Generuje plazma pomocí mikrovln. Často využívanými frekvencemi jsou 2,45 GHz a 2,24 GHz. Ionizační stupeň odpovídá radiofrekvenčnímu induktivně vázanému výboji. Dosahuje vysokého stupně ionizace i teplot. Substrát (kterým může být například upravovaný výrobek) nemusí být vystaven přímému vlivu plazmatu, což umožňuje využití tohoto druhu výboje při tzv. „Downstreamovém“ uspořádání pro úpravu tepelně citlivých materiálů [24][30][59][60].

Doutnavý výboj – K tomuto druhu výboje dochází při průchodu elektrického proudu skrze výbojku za sníženého tlaku a s jednou z elektrod pokrytou dielektrikem, přičemž při něm prochází výbojkou velmi nízký proud (miliampéry) a systém se tak jen minimálně zahřívá, díky čemuž se doutnavý výboj využívá jako úsporný zdroj světla (například ve rtuťových výbojkách). Má vyšší energii než koronový výboj, ale je náročnější jej stabilizovat a udržet [24][30].



Obr. 12 *– Doutnavý výboj s viditelnými vrstvami [61]*

3.7.2.2 Výboje za atmosférického tlaku

Vzhledem k tomu, že není nutné vytvářet vakuum, jsou výboje za atmosférického tlaku finančně výhodnější a při použití v průmyslu je možná i kontinuální produkce.

Obloukový výboj – Vzniká při krátkém kontaktu a oddálení kovových nebo uhlíkových elektrod, které se dotykem rozžhaví, načež se mezi nimi ionizuje plyn a umožní tak průchod elektrického proudu. Charakteristický intenzivním světlem a vysokými teplotami (až 6000 K), které vznikají v důsledku procházejícího proudu, což dále přispívá k ionizaci plynu, díky čemuž je možné výboj udržet i při relativně nízkém napětí. Katoda se vlivem dopadu kladných iontů zahrocuje, zatímco v anodě se v důsledku dopadajících elektronů vytváří kráter. Využívá se k obloukovému svařování, v obloukových lampách apod. [32][62].

Jiskrový výboj – Vzniká při překročení průrazného napětí mezi dvěma objekty a jedná se o krátkodobý průraz vzduchové vrstvy. Dochází v něm ke zvýšení teploty až na 30 000 K. Doprovázen světelnými i akustickými projevy. Nejznámějším příkladem jiskrového výboje je blesk, při kterém dochází k vyrovnání potenciálových rozdílů mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí. Potenciálové rozdíly v takovém případě mohou dosahovat až milionů voltů [32][64].

Koronový výboj – Vzniká na ostrých hranách elektrod, kde je elektrické pole díky nízkému poloměru křivosti nejsilnější. Projevuje se jako fialové světlo v okolí těchto hran a přenáší se do prostoru za pomocí volných nosičů náboje. Běžný jev při atmosférickém tlaku. Objevuje se například v blízkosti vedení vysokého napětí, kde způsobuje ztráty energie [64].

Obr. 13 *– Koronový výboj na plazmovém kole [63]*

3.7.2.3 Dielektrický bariérový výboj (Dielectric barrier discharge)

Tento druh výboje, též nazývaný „tichý výboj“ je též generován za atmosférického tlaku a má široké možnosti využití, například pro plazmatické čištění, funkcionalizaci povrchů či inaktivaci mikrobů (Může být aplikován i přímo na lidskou tkáň) [65]. Hlavním znakem tohoto druhu výboje je vláknitý (filamentární) charakter. Při atmosférickém tlaku v něm vzniká velké

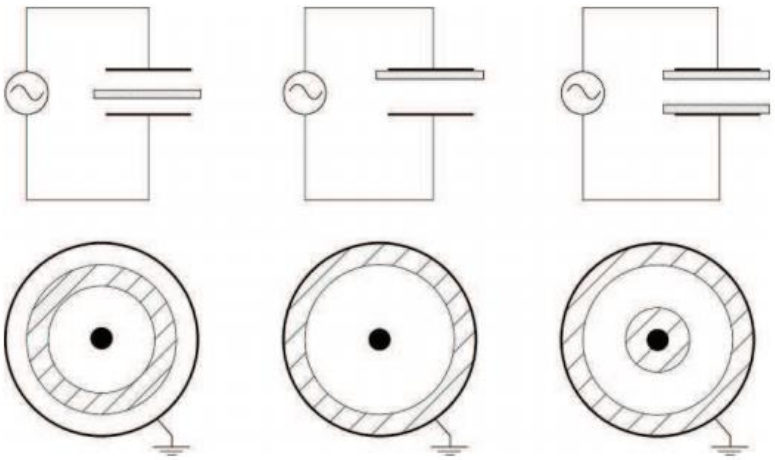
množství velice tenkých vláken (řádově 100μm), která se v dolní části rozšiřují na povrchový výboj s poloměrem okolo 0,5cm [32].

První zmínka o tomto druhu výboje se objevila roku 1857, kdy Siemens sestrojil ozonizátor, který jej využíval. Byl tvořen dvěma skleněnými trubicemi a elektrodami, které nebyly v přímém kontaktu s plazmatem. Konfigurace ozonizátoru odpovídá objemovému bariérovému výboji [65].

Elektrodový systém dielektrických bariérových výbojů je tvořen vodivými elektrodami, které jsou odděleny jednou či několika dielektrickými přepážkami. Elektrody nemusí být pouze kovové, může je například tvořit elektricky vodivá kapalina nebo plazma. Výboj je buzen střídavým nebo pulzním napětím, má dobu trvání v řádu desítek ns a budí nízkoteplotní neizotermní plazma, jehož elektrony typicky dosahují energie v rozmezí 1-10 eV a dokáží účinně generovat nabité a excitované částice a radikály, což plazmatu vytvořenému tímto druhem výboje dává vhodné vlastnosti pro aplikace v plazmochemii [65][66].

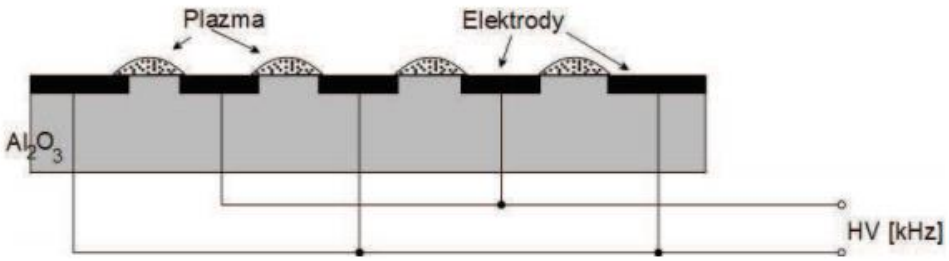
Z hlediska konfigurace elektrod a dielektrika v zařízení se bariérové výboje dělí na objemové, povrchové a koplanární [32]. Dále vlastnosti výboje ovlivňuje geometrická konfigurace výbojového prostoru a elektrod, vlastnosti dielektrické vrstvy (složení, čistota, porozita, dielektrické vlastnosti), pracovní plyn a velikost a frekvence budícího napětí [66].

Objemový výboj – Probíhá mezi dvěma elektrodami (válcovými nebo rovinnými), jejichž konfigurace musí být taková, aby mezi nimi vznikl ohraničený prostor (mezera). Plazma vzniká na povrchu dielektrických bariér. Výhodou tohoto uspořádání je především technická jednoduchost, nízké nároky na použité dielektrikum a relativně velký objem vytvořeného plazmatu. Kromě konfigurace elektrod se dělí i podle umístění dielektrické bariéry nebo bariér [32][66].



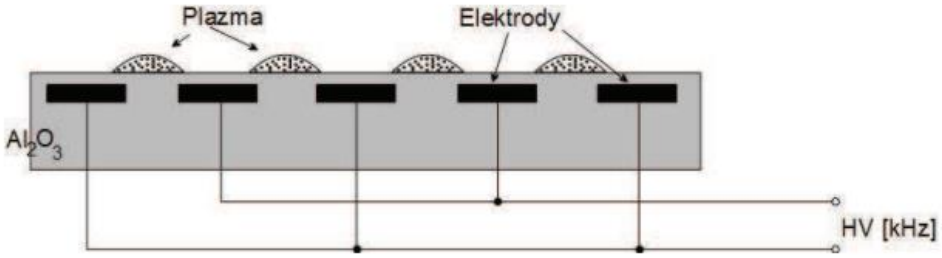
Obr. 14 *– Rovinné a cylindrické uspořádání elektrod objemového výboje [66]*

Povrchový výboj – Probíhá na povrchu elektrody tvořené dielektrickou bariérou, obvykle vyrobenou z keramiky (Al_2O_3), a soustavou elektrod v podobě kovových pásků vystavených na povrchu dielektrika. Na spodní straně bariéry je umístěná plošná, uzemněná elektroda. Plazma je generováno na povrchu dielektrika okolo vrchní elektrody, případně více elektrod [32][66].



Obr. 15 *– Povrchový dielektrický bariérový výboj [66]*

Koplanární výboj – Probíhá na povrchu dielektrika, pod jehož povrchem jsou umístěny koplanární (umístěné v jedné rovině) elektrody. Ty jsou obvykle tvořeny pásky stejných rozměrů vzdálených od sebe řádově 1 mm. Tvar výboje je nezávislý na polaritě a je podobný povrchovému výboji. Tato konfigurace kombinuje výhody objemového a povrchového výboje. Není v něm například problém s erozí kovových elektrod vlivem iontového bombardování, neboť jsou uzavřené v dielektriku [32][66].



Obr. 16 *– Koplanární dielektrický bariérový výboj [66]*

3.7.2.4 Piezoelektrický přímý výboj (PDD)

Relativně nová metoda tvorby plazmatu. Využívá piezoelektrický transformátor pro přeměnu nízkého vstupního napětí na silné elektrické pole, čímž umožňuje vytvářet nízkoteplotní plazma. Velkou výhodou je vysoká energetická hustota a možnost pracovat s nízkým příkonem a napětím, což umožnilo tvorbu kompaktnějších a přenosných zařízení. Tato technologie (obchodním názvem CeraPlas^{TM}) je registrovanou obchodní značkou firmy Relyon Plasma [108].

4. Plazmatická úprava povrchu

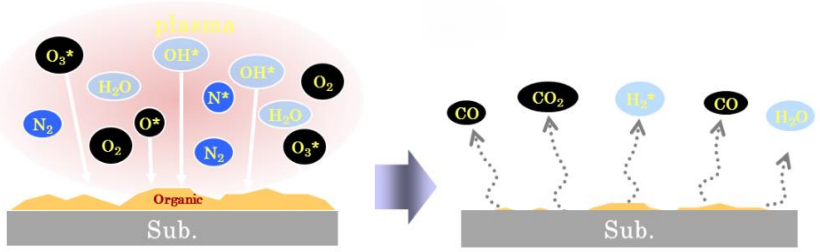
Plazma je vhodnou alternativou k chemické úpravě povrchů. Metody, jež jej využívají, jsou rychlé, účinné, čisté, suché a probíhají za relativně nízké teploty, což umožňuje upravovat i látky, které by vysoká teplota zničila, navíc nezpůsobují degradaci povrchů a především nevyžadují použití potenciálně toxických rozpouštědel a katalyzátorů, které by mohly povrch (nebo jiný upravovaný objekt, například nanovlákna) poškodit či znemožnit následné využití v určitých oblastech lidské činnosti, především medicíně. Plazma navíc skutečně ovlivňuje pouze povrch materiálu a nemění vnitřní strukturu, takže materiál si zachovává stejné vlastnosti [73][74][75][77].

Při použití plazmatu pro změnu vlastnosti povrchů, například pro povrchovou aktivaci, obvykle bývají změny vlastností trvalé, i když při některých experimentech bylo prokázáno, že se postupně obnovují původní vlastnosti. Například při experimentu s PVA, pektiny a jejich směsí vyšlo najevo, že se po úpravě obnovuje hydrofobita jejich povrchu, nicméně na původní hodnoty se nedostala ani po 44 dnech skladování. Dále například při testování plazmatické aktivace a jejího vlivu na funkcionalizaci (navázání jiných látek na povrch) křemičitých nanovláken nebyl patrný žádný pokles efektivity až do doby 21 dní skladování [76][77].

Plazma je využíváno pro čištění, aktivaci či leptání povrchů a pro tvorbu tenkých vrstev, přičemž všechny tyto postupy mají své využití jak v průmyslu, tak například v medicíně [78].

4.1 Čištění povrchu

Pomocí plazmatu je možné vyčistit povrch materiálu od nečistot či nebezpečných látek. To je v dnešní době nezbytné pro prakticky jakoukoliv následnou úpravu povrchů, například nanášení tenkých vrstev nebo povrchovou aktivaci. Tradiční procesy čištění obvykle využívají vysoké teploty, a jsou tedy nevhodné na mnohé materiály. Lze využívat plazma vznikající za sníženého i atmosférického tlaku, včetně plazmatu vytvářeného ze samotné atmosféry, většinou pomocí dielektrického bariérového výboje. Jednou z nevýhod tohoto druhu čištění je velmi pomalé odstraňování nečistot (v řádu nm/s), proto se používají především na jejich vrstvy, které jsou maximálně několik mikrometrů silné [79][80][84].



***Obr. 17** – Plazmatické čištění povrchu [81]*

Čištění může probíhat různými mechanismy v závislosti na použitém pracovním plynu. Kromě samotné atmosféry pro tyto účely bývá využíván kyslík, vodík, argon či dusík, přičemž nejčastěji používaným plynem pro tento účel je kyslík. Kromě pracovního plynu čištění závisí i na tlaku, výkonu budícího zdroje, průtoku plynu a délce procesu [84].

Kyslík – Reaguje s molekulami na povrchu a rozkládá je na nestabilní látky. Je velice efektivní při čištění povrchu od organických nečistot. Pro tento druh čištění není vždy nutné používat čistý kyslík, lze použít i vzduch [83][84].

Vodík – Silné redukční činidlo. Vodíkové plazma je velmi efektivní v odstraňování povrchových zoxidovaných filmů, což se hodí například po čištění pomocí kyslíkového plazmatu, které povrch zoxiduje [83][84].

Argon - Jakožto vzácný plyn není reaktivní, nicméně jeho ionty jsou těžší než u ostatních plynů, díky čemuž jej je možné použít pro čištění povrchů pomocí mikroabraze. V kombinaci s dusíkem může být využit i pro redukci zoxidované povrchové vrstvy [83][84].

Dusík – Bývá využíván v kombinaci s argonem, ale dusíkové plazma samo o sobě povrch nitriduje (zabudovává dusík do povrchové vrstvy) [82][84].

Za specifický druh čištění povrchu může být považována sterilizace, tedy ničení škodlivých mikroorganismů, která je potřebná především v medicíně, pro operační sály, klinická pracoviště, externí zákazníky apod. Při ní je nezbytné, aby nebyly na povrchu zanechány jakékoliv škodlivé produkty sterilizačního procesu, což plazma splňuje. Pro sterilizaci může být použit například peroxid vodíku (STERRAD®), který po dokončení procesu zreaguje na vodu a kyslík [85].

4.2 Povrchová aktivace

Provádí se pro zvýšení adheze, smáčivosti a reaktivity povrchu. Mnohé materiály by bez povrchové aktivace nebylo možné dále upravovat, například lakováním. Při použití plazmatu dochází k depozici volných radikálů, které v něm samovolně vznikají, na povrch materiálu, kde následně velmi rychle zreagují za vzniku nových funkčních skupin, obvykle hydrofilních. Pro aktivaci lze použít nízkotlaké i atmosférické plazma, nicméně častěji se využívá atmosférické, kvůli možnosti kontinuální produkce. Lze použít i studené plazma, má totiž dostatečnou energii pro narušení původních vazeb a aktivaci povrchu [86][87].

Kromě obvyklých výhod plynoucích z použití plazmatu lze pomocí něj opracovávat i složité a členité povrchy, na rozdíl od ožehu nebo úpravy koronou. Plazmatická aktivace navíc může být prováděna zároveň s čištěním povrchu, pro které lze též použít plazma, což zlevňuje a zefektivňuje celý proces [86].

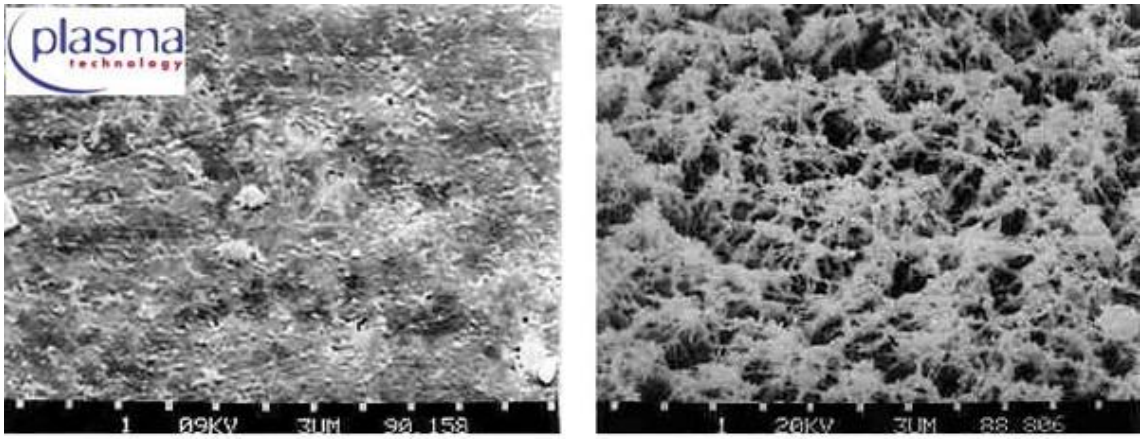
Efektivita plazmatické aktivace závisí na použitém pracovním plynu i na povrchu, který prochází úpravou. Například pro aktivaci křemičitých nanovláken je nejvhodnější použít kyslíkovou atmosféru, neboť kyslík je sám o sobě součástí jejich struktury a úprava vystavuje na povrchu silanolové (-OH) skupiny, které pak umožňují navázání dalších látek a zvyšují smáčivost nanovláken [77].

Při použití v medicíně může mít plazmatická aktivace ještě jeden efekt navíc, konkrétně u některých materiálů sama o sobě zvyšuje jejich biokompatibilitu. Například při studii provedené na nanovlákenných polykaprolaktonových scaffoldech bylo zjištěno téměř trojnásobné zlepšení biokompatibility [89].

4.3 Leptání povrchu

Tento druh úpravy je využíván z podobných důvodů, jako povrchová aktivace, tedy zvýšení adheze a smáčivosti povrchu pro následné úpravy, nicméně zatímco aktivace spočívá ve změně funkčních skupin na povrchu látky, leptání mění topografii povrchu, zvyšuje jeho hrubost a celkovou funkční plochu. Použití plazmatu opět představuje vhodnou alternativu proti mokrým procesům prováděných pomocí korozivních látek, neboť je jednak suché a netoxické, a navíc může být použito na prakticky jakýkoliv materiál.

Plazma zde bombarduje povrch a reaguje s ním za rozbíjení povrchové vrstvy materiálu a jejího uvolňování do okolního prostoru, odkud jsou vzniklé částice odsávány. Způsob, kterým plazma reaguje s povrchem, a tedy i efektivita leptání, závisí na pracovním plynu. Například tetrachlormetan dokáže dobře leptat povrch čistého křemíku a hliníku, ale leptání oxidu křemičitého a nitridu křemičitého vyžaduje použití trichlormetanu. Leptáním je také možné odstranit povrchovou zoxidovanou vrstvu (argonové plazma použité na povrch titanu) [90][91].



Obr. 18 *– Polyoxymetylén před (vlevo) a po leptání pomocí plazmatu [88]*

Dále se podle mechanismu reakce s povrchem dělí na tři metody, a to leptání iontové, chemické a leptání reaktivními ionty [91].

Iontové leptání – Též známé jako fyzikální leptání, sputtering nebo micro-sandblasting. Využívá argon nebo jiné vzácné plyny, ale jejich ionty nevytvářejí volné radikály. Leptání povrchu je důsledkem vyražení atomů či molekul pomocí kinetické energie částic urychlených v elektrickém poli [91].

Chemické plazmatické leptání – Využívá pracovní plyny, jejichž molekuly se štěpí na radikály, které následně reagují s povrchem materiálu a přeměňují jeho částice na plynné produkty. Lze jej využít například pro odstraňování vrstev oxidů nebo tvorbu polovodičových struktur a mikrostruktur [91].

Leptání reaktivními ionty – Pracovní plyny vytvářejí v plazmatu radikály a pozitivně nabité ionty, které mohou leptat povrch jak pomocí reaktivních radikálů, tak samotnou kinetickou energií iontů. Tato metoda kombinuje vlastnosti iontového a chemického plazmatického leptání. Její hlavní výhodou je především výrazně vyšší rychlost leptání [91].

4.4 Tvorba tenkých vrstev

Za tenkou vrstvu označujeme materiál dosahující tloušťky od několika desítek nanometrů po desítky mikrometrů. Tenké vrstvy jsou vytvářeny z materiálu jiného, než je materiál modifikovaného objektu (ten se nazývá substrát). Vlastnosti tenké vrstvy jsou odlišné od vlastností substrátu a jsou závislé na materiálu (jak substrátu, tak tenké vrstvy), na metodě a podmínkách vzniku tenké vrstvy. Systém tenká vrstva-substrát lze rozdělit na samotný substrát, rozhraní substrátu a tenké vrstvy a samotnou tenkou vrstvu. Všechny tyto oblasti mají významný vliv na vlastnosti celého systému [96].

Plazma je při tvorbě tenkých vrstev využíváno v metodách depozice z plynné fáze (fyzikální a plazmatem podporovaná chemická). Další metodou pro tvorbu tenkých vrstev je pak plazmatická polymerizace. Tyto procesy obvykle probíhají za sníženého tlaku [92][93].

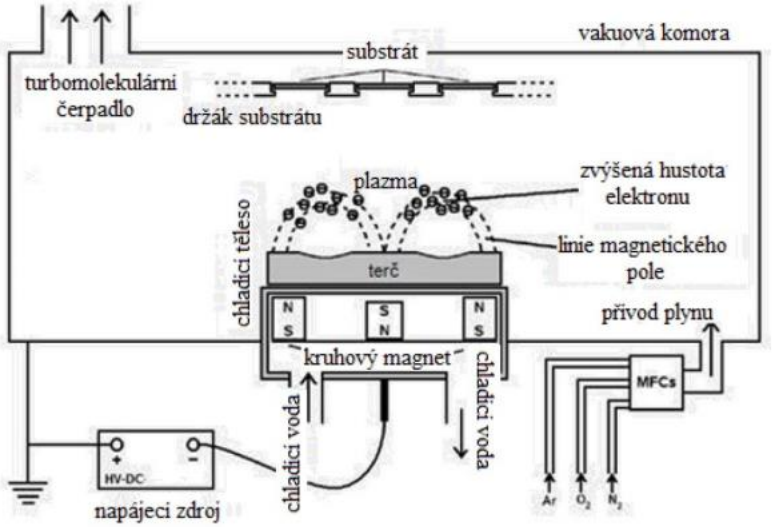
Za speciální případ tvorby tenké vrstvy lze považovat nitridaci povrchu, kdy je aplikací dusíkového plazmatu zabudováván dusík do struktury povrchové vrstvy materiálu. Tento efekt funguje dobře například u křemičitých nanovláken a jiných látek, jež mají ve struktuře kyslík, který může být dusíkem snadno nahrazován. Nitridaci lze využít například pro úpravu titanových implantátů, kdy na jejich povrchu vznikne oxynitrid titanu, který výrazně zlepší jejich osseointegraci (srůstání s kostí). Té napomáhá i změna topografie povrchu, ke které dochází v důsledku plazmatického leptání [82][94].

4.4.1 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition) je založena na depozici tenké vrstvy pomocí převedení pevného materiálu do plynného stavu a jeho následného nanesení na substrát. Probíhá za tlaku od 100 do 10^{-8} Pa a za teploty v rozmezí od 150 do 500°C. Základními metodami PVD jsou napařování a naprašování, přičemž u napařování je materiál převáděn do plynného stavu pomocí elektrického oblouku (též obloukové odpařování) a u naprašování je odprašován dopadajícími ionty (magnetronové naprašování). Obecně se proces dá rozdělit do tří fází [95][96].

- Převedení pevného materiálu do plynné fáze
- Transport par ze zdroje k substrátu
- Vytváření vrstvy na povrchu substrátu

Mezi výhody PVD patří možnost pokovovat ostré hrany, vysoká odolnost a přesnost vrstev, možnost vyrábět mnoho druhů vrstev a nízká teplota celého procesu. Nevýhodou však je nutnost použití složitého vakuového systému a nutnost pohybovat s povlakovaným předmětem [95].



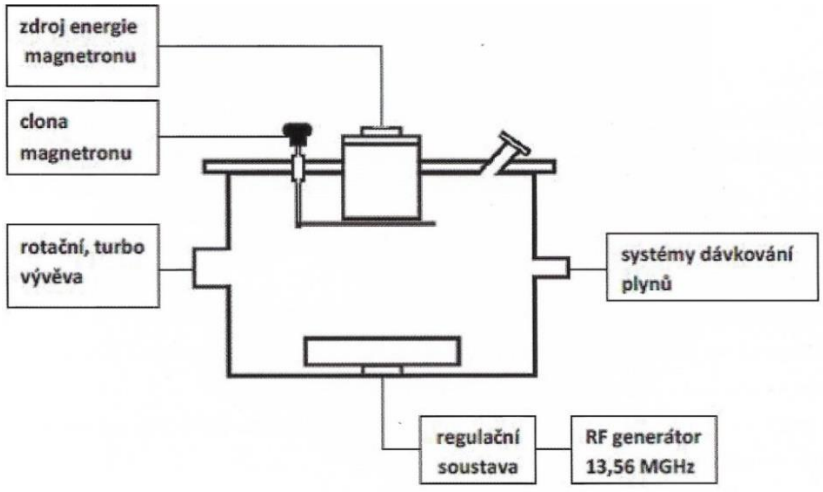
Obr. 19 *– PVD naprašování [95]*

4.4.2 Plazmatem podporovaná chemická depozice z plynné fáze (PACVD)

Samotná metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) je založena na chemické syntéze v plynné fázi, kdy je substrát vystaven účinkům jednoho nebo více prekurzorů, které na jeho povrchu reagují nebo se rozkládají za vzniku požadovaného materiálu. Pomocí řízení přívodu plynů je možné vytvářet gradientní vrstvy různých druhů látek, například silicidů titanu ($TiSi_x$), nitridů titanu (TiN_x) či karbidů titanu (TiC_x). Velkou nevýhodou této metody je vysoká teplota, která je nutná pro disociaci reaktantů [97][98].

Metoda PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) je založena na podpoře klasické CVD metody plazmatem. Konkrétně bývá využíván doutnavý výboj k ionizaci pracovních plynů v komoře. Ten vytváří plazma, jehož vysoká reaktivita zajistí, že reakce a depozice na povrch proběhne za mnohem nižších teplot než u samotné CVD metody. Je pro tuto metodu nutná teplota okolo 500 K, díky čemuž je možné PACVD používat na mnohem větší škálu povrchů [96].

Existují i metody, které kombinují PVD a PACVD. Konkrétním příkladem může být metoda RF PA CVD/MS (Radio Frequency Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition/Magnetron Sputtering). Jak napovídá název, tato metoda využívá ke generování plazmatu radiofrekvenční výboj (nejčastěji 13,56 MHz), využívá metodu PACVD a jedna ze složek reakce je získávána pomocí rozprašování materiálu z pevné látky (PVD metoda). Tyto hybridní procesy umožňují připravit vrstvy, které nelze připravit samotnými PVD a PACVD metodami [96].



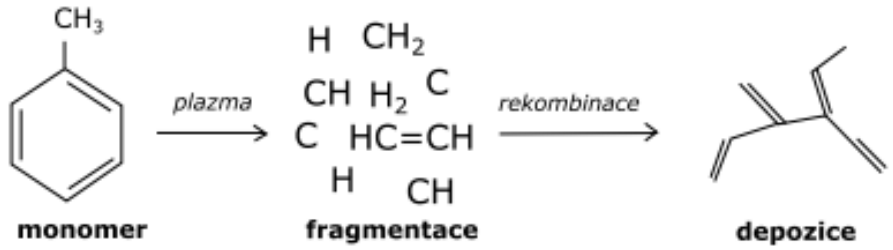
***Obr. 20** – Schéma zařízení RF PA CVD/MS [96]*

4.4.3 Plazmatická polymerizace

Metoda, u které je výsledkem plazmochemické depozice tenký organický film. Fyzikální i chemické vlastnosti takto připravených polymerů se výrazně liší od polymerů připravených klasickou polymerizací. Konvenčně připravené polymery jsou definovány jako makromolekulární látky tvořené mnoha monomerními jednotkami. Plazmatické polymery nemají pravidelnou strukturu a jsou silně větvené a síťované, neboť při plazmatické polymeraci dochází k fragmentování molekuly monomeru na mnoho různých částí. Mechanismus se také liší od klasické polymerizace. Většina elektronů dosahuje energie okolo 2-4 eV (dáno Maxwell-Boltzmannovým rozdělením) a v nízkotlakém plazmatu dochází jejich vlivem k fragmentaci

molekul monomeru a vzniku silně reaktivních radikálů, nejčastěji rozštěpením uhlíkového řetězce nebo odštěpením vodíku [92].

Jedním z nejznámějších popisů reakčního mechanismu je tzv. atomová polymerizace. Tento model předpokládá, že molekuly monomeru se vlivem plazmatu fragmentují až na jednotlivé atomy, jež následně náhodně rekombinují v objemu plynu a reagují s plazmatem aktivovaným povrchem substrátu za vzniku struktur s vyšší molekulovou hmotností. Tento proces se opakuje za vzniku polymeru, který je silně větven, síťován a jeho chemická struktura je primárně ovlivněna mírou fragmentace monomeru, nikoliv jeho strukturou. Tento model byl rozšířen za vzniku RSGP modelu, který předpokládá, že polymerizace probíhá prostřednictvím stupňovité postupné rekombinace mezi radikály a biradikály, jež vznikají v důsledku interakce plazmatu s molekulami prekurzoru, a že mechanismus polymerizace je cyklický, neboť produkty rekombinace může plazma opět aktivovat, reaktivní částice tedy vznikají i fragmentací již deponovaného plazmatického polymeru či materiálu, jež se nachází na stěnách reaktoru. Plazma navíc dále ovlivňuje povrch, na kterém dochází k leptání a ablaci deponované vrstvy. Výsledná vrstva je tedy výsledkem rovnováhy mezi depozicí a leptáním [92].

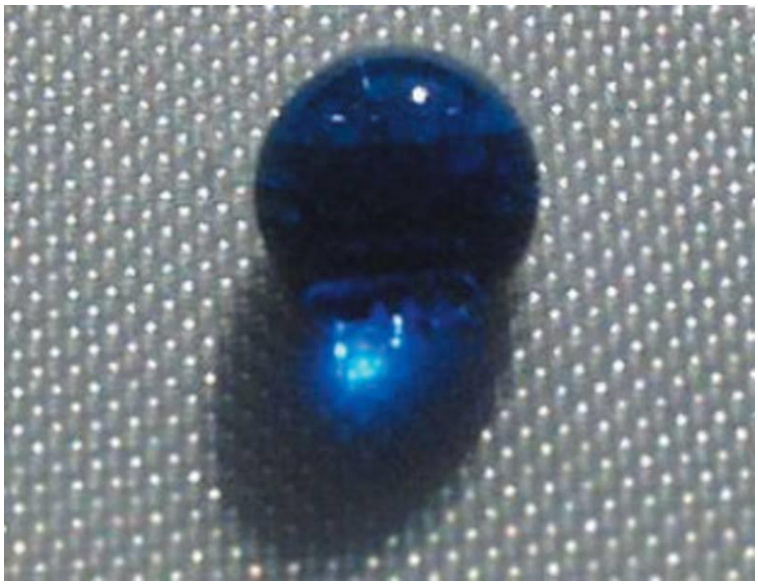


Obr. 21 *– Atomová polymerizace [92]*

5. Využití plazmatu k modifikaci povrchové energie

Tato kapitola se zabývá možnostmi modifikace povrchové energie, tedy systémy s rozhraním mezi kapalinou a pevnou látkou, nikoliv rozhraním mezi plynem a kapalinou. Úpravy lze dělit na hydrofilní a hydrofobní, kde hydrofilní povrchovou energii zvyšují a hydrofobní ji snižují. Obojí má svá využití.

Vysoká povrchová energie má za následek velkou smáčivost, což zvyšuje adhezi povrchu k lakům, barvám či lepidlům a zlepšuje vlastnosti filtračních textilií a jiných druhů filtrů. Nízká povrchová energie a tedy nízká smáčivost zase vytváří povrchy odpuzující vodu a jiné kapaliny, což může dát povrchům samočistící funkci či je učinit odolnějšími vůči reaktivním kapalinám. Také umožňuje vytvořit voděodolné látky a snižuje koeficient tření [101].



Obr. 22 *– Povrch odolný vůči vodě a nečistotám [101]*

5.1 Hydrofilní a hydrofobní úpravy

Většina procesů využívajících plazma povrchovou energii zvyšuje. Ke zvýšení povrchové energie je možné odstraňovat vrstvy nečistot na povrchu pomocí plazmatického čištění, kterým lze odstranit nejrůznější látky, včetně hydrofobních vrstev organických látek (tuky, oleje apod.). Dále povrchovou energii zvyšuje odstranění zoxidované povrchové vrstvy, k čemuž lze též využít plazma (především vodíkové, neboť vodík je silné redukční činidlo). Metodou přímo určenou ke zvyšování povrchové energie většiny povrchů je pak plazmatická aktivace, která na povrchu vytváří polární skupiny (nejlépe za použití kyslíkového plazmatu). Poslední možností je použití metod pro depozici tenkých vrstev využívajících plazma k vytvoření vrstvy hydrofilní látky nebo polymeru, například polyvinylacetátu [101].

Pro snižování povrchové energie je možnost využití plazmatu mnohem omezenější, podle společnosti Diener electronic [102] je jedinou možností použít metody pro depozici tenkých vrstev, které využívají plazma, nebo plazmatické polymerizace a s jejich pomocí na povrchu vytvořit tenkou vrstvu hydrofobní látky, například využít pracovní plyn s fluoridovými monomery, jež polymerizuje za vzniku Polytetrafluorethylenu [101].

6. Geopolymery

Geopolymery jsou skupina anorganických polymerních materiálů vytvářených z hlinitokřemičitanů (nejběžnějších hornin), které vznikají anorganickou polykondenzací (geopolymerací) v alkalickém prostředí, kdy vznikají kovalentní vazby Si-O-Al-O a hlinitokřemičitany přechází do dalších forem, například polysialátu. Obecně mohou být geopolymerizovány jakékoliv minerální jíly s dostatečně vysokým obsahem oxidu křemičitého a hlinitého. Vykazují výborné mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku i tahu), jsou nehořlavé, odolné vůči UV záření a dlouhodobě stálé. Při jejich výrobě je k dosažení polykondenzace používáno tzv. vytvrzovacích procesů, které probíhají při normální nebo mírně zvýšené teplotě za atmosférického tlaku, což činí jejich výrobu energeticky nenáročnou. Čistý materiál může být využíván k zapouzdření radioaktivního materiálu nebo jedovatých chemikálií. Dále mohou být používány jako pojivo ve speciálních betonech či jako matrice kompozitů k výrobě forem a nástrojů ve zpracovatelském průmyslu, mají však využití i v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu či ve stavebnictví [103][104][105].

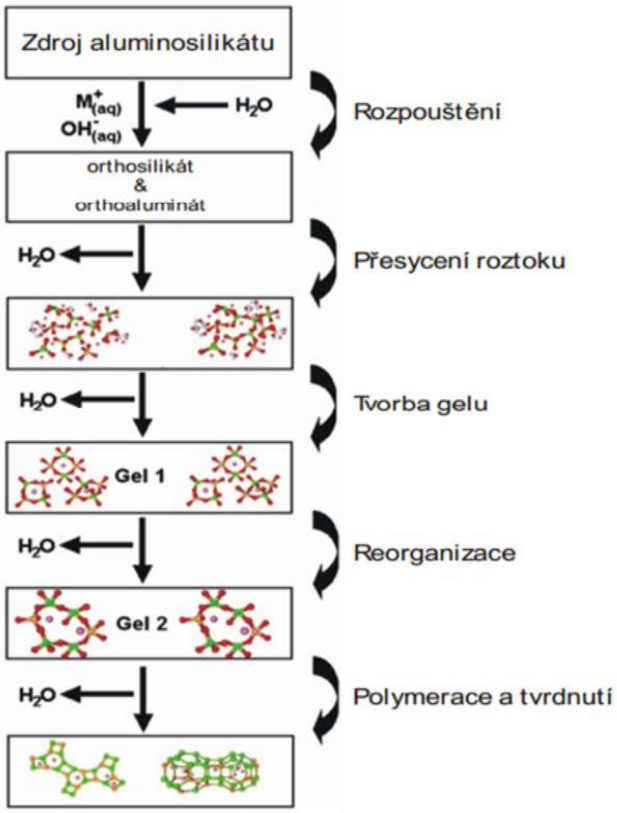
Obr. 23 *– Různě zbarvené vzorky geopolymeru [106]*

První pokusy s alkalickou aktivací pískových materiálů proběhly v třicátých letech v Německu. V šedesátých letech byla alkalická aktivace zkoumána v Glutovského institutu v Kyjevě (rozpouštění strusky pomocí hydroxidu sodného a vodního skla). V SSSR byly geopolymery používány například k výrobě železničních pražců pod názvem gruntocementy. V Československu byly geopolymery poprvé zkoumány zhruba v roce 1970. Název geopolymer byl poprvé zaveden v osmdesátých letech profesorem Josephem Davidovitsem. [105].

6.1 Geopolymerace

Též nazývaná vytvrzování. Nastává, pokud je hlinitokřemičitý materiál v kontaktu s alkalickým roztokem o vysokém pH (vyšším než 12). Proces je podobný výrobě plastů, ale geopolymery mají vlastnosti podobnější keramickým materiálům. Geopolymerní syntéza se skládá ze tří kroků [104][107].

- Rozpuštění hlinitokřemičitanu silným alkalickým roztokem díky reakcím s hydroxylovými ionty.
- Reorientace iontových shluků
- Vznik anorganického „polymeru“ pomocí polykondenzace



Obr. 24 *– Zjednodušený princip geopolymerace [104]*

6.2 Struktura geopolymerů

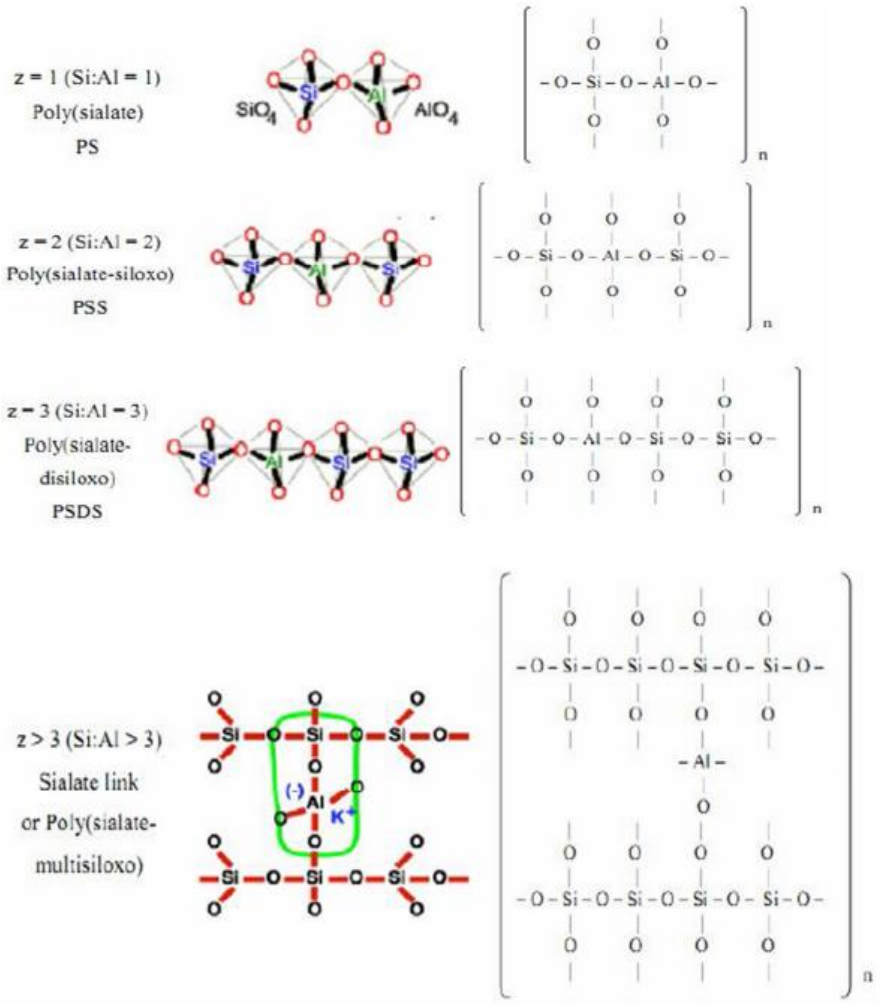
Základem struktury geopolymerů je třírozměrná hlinitokřemičitá báze, která má následující empirický vzorec:

$$M_n(- (SiO_2)_z – AlO_2)\ n \cdot wH_2O \qquad \text{(Vzorec 1)}$$

Kde *M* je jednomocný kation, *z* je přirozené číslo značící počet jednotek SiO_2 a *n* stupeň polymerizace [103][104].

Atomy hliníku a křemíku jsou v polysialátech v tetraedrickém uspořádání s atomy kyslíku a struktura je částečně krystalická. V polymerních řetězcích se také mohou objevovat další vazby, což je označováno jako síťující prvek. Zesíťování však může proběhnout pouze v případě, kdy je poměr atomů křemíku a hliníku v geopolymeru vyšší než 2. Polysialáty se podle tohoto poměru dále dělí [103][104].

- Poly(sialát) – Si-Al = 1:1
- Poly(siloxo-sialát) – Si:Al = 2:1
- Poly(disiloxo-sialát) – Si:Al = 3:1
- Poly(multisiloxo-sialát) – Si:Al > 3:1



Obr. 25 *– Druhy polysialátů [104]*

7. Experimentální část

V experimentální části této práce bylo nejdříve dle zadání připraveno 5 sad geopolymerních vzorků, které se lišily příměsí či použitým geopolymerním základem. Všechny sady, kromě geopolymerního základu (prášek a tekutý aktivátor), obsahovaly též sklářský písek a siliku. U všech sad byly připraveny jak kompaktní, tak vypěněné vzorky, přičemž pro vypěnění byl použit práškový hliník. Část vzorků byla rozřezána za účelem testování jejich řezu.

U těchto vzorků byla následně testována jejich nasákavost a hydrofilita pomocí měření povrchového úhlu na přístroji Surface energy evaluation systém. Kromě neupravených vzorků byly též testovány vzorky upravené atmosférickým plazmatem pomocí Piezobrush PZ2, lakem Revacryl UF 4210 či jejich kombinací. Bylo zhodnoceno, zda aplikace plazmatu vedla k výraznému zvýšení hydrofility a nasákavosti, a zda byl povrch po aplikaci laku nepropustný pro vodu.

Získané výsledky byly poté porovnávány, aby byl zjištěn vliv příměsí. Konkrétně byly porovnávány vzorky bez příměsí vláken se vzorky s příměsí vláken, vzorky bez příměsi spalin se vzorky s příměsí spalin (5, resp. 10 hm. %) a vzorky bez speciálních přísad lišící se použitým geopolymerním základem (sodným a draselným).

7.1 Použité materiály a chemikálie

7.1.1 Seznam použitých chemikálií a materiálů

- Baucis L_{Na}, složka A (cement) a B (tekutý aktivátor), České lupkové závody a.s
- Baucis L_K, složka A (cement) a B (tekutý aktivátor), České lupkové závody a.s
- Křemenný sklářský písek, Sklopísek Střeleč
- Silika RW-Füller, AMG Silicon
- Hliníkový prášek AIPRA, PK Chemie
- Čedičová vlákna (délka 6 mm, šířka 13 μm) - ORLIMEX CZ, s.r.o.
- Revacryl UF 4210, Synthomer
- Popel z odlučovače tepelné elektrárny - Polska Grupa Energetyczna

7.1.2 Geopolymer

Pro účely práce bylo připraveno několik sad geopolymerních vzorků vytvořených ze sodného cementu Baucis L_{Na} a aktivátoru na bázi vodního skla a hydroxidu sodného (tyto dvě látky jsou též označovány jako Baucis L_{Na} – složka A a B). Dále byl při přípravě všech vzorků použit písek, sloužící jako plnidlo, a Silika (SiO_2). Vzorky se pak lišily podle obsahu dalších látek a každá sada obsahovala vzorky tvořené kompaktním a vypěněným geopolymerem. Do směsi pro vypěněné geopolymery byl těsně před nalitím do forem přidáván hliník, který pomocí

reakce s alkalickými látkami ve směsi (především hydroxidem sodným) vytváří vodík. Pro účely porovnání byla též připravena jedna sada z draselného Baucisu.

- První sada vzorků byla vytvořena pomocí dodaného receptu standardně používaného na Technické Univerzitě v Liberci, kromě výše vypsaných látek byla do směsi přidána čedičová vlákna (viz. Tabulka 1).
- Druhá sada byla připravena pouze z cementu, aktivátoru, písku a siliky (viz. Tabulka 2).
- Třetí sada byla připravena z cementu, aktivátoru, písku, též do ní bylo přidáno 5 hmotnostních procent spalin tvořených především čistý m uhlíkem ve formě grafitu (viz. Tabulka 3).
- Čtvrtá sada byla připravena z cementu, aktivátoru, písku, též do ní bylo přidáno 10 hmotnostních procent spalin tvořených především čistým uhlíkem ve formě grafitu (viz. Tabulka 4).
- Pátá sada byla připravena pouze z cementu, aktivátoru, písku a siliky, přičemž byl k přípravě použit Baucis L_K (viz. Tabulka 5).

Tabulka 1 *- Množství vstupních látek pro přípravu první sady geopolymerních vzorků*

Látka	**m [g]**
Cement	1000
Aktivátor	900
Silika (SiO_2)	50
Písek	1000
Čedičová vlákna	70
Hliník (Pro vypěněný)	15

Tabulka 2 *- Množství vstupních látek pro přípravu druhé sady geopolymerních vzorků*

Látka	**m [g]**
Cement	1000
Aktivátor	900
Silika (SiO_2)	50
Písek	1000
Hliník (Pro vypěněný)	15

***Tabulka 3** - Množství vstupních látek pro přípravu třetí sady geopolymerních vzorků*

Látka	m [g]
Cement	1000
Aktivátor	900
Silika (SiO_2)	50
Písek	1000
Spaliny	160
Hliník (Pro vypěněný)	15

***Tabulka 4** - Množství vstupních látek pro přípravu čtvrté sady geopolymerních vzorků*

Látka	m [g]
Cement	1000
Aktivátor	900
Silika (SiO_2)	50
Písek	1000
Spaliny	330
Hliník (Pro vypěněný)	15

***Tabulka 5** - Množství vstupních látek pro přípravu páté sady geopolymerních vzorků*

Látka	m [g]
Cement (draselný)	1000
Aktivátor (draselný)	900
Silika (SiO_2)	50
Písek	1000
Hliník (Pro vypěněný)	15

Do promíchané směsi cementu a plniva (písku) byl přidán aktivátor a celá směs byla míchána, dokud nezískala tekutou konzistenci. Následně do ní byly přidány další složky pro dané vzorky a směs byla dále míchána, dokud nezískala tekutou konzistenci z důvodu uvolnění vody v důsledku zahájení polykondenzace. Do směsi pro přípravu vypěněného geopolymeru byl následně přidán hliník a směs byla nalita do forem, zatímco směs pro kompaktní geopolymer byla setřesena, aby byla zbavena vzduchových bublin, a až poté byla nalita do forem.

Naplněné formy byly poté zabaleny do fólie, označeny a ponechány po dobu jednoho dne, načež byly vloženy na 5 hodin do sušárny při teplotě 45°C. Po vysušení byly vzorky vybaleny z fólie a ponechány v peci při teplotě 82°C po dobu 15 hodin. Vzorky byly následně rozřezány, propláchnuty vodou a ponechány v sušárně na dalších 5 hodin při teplotě 45°C.

Obr. 26 *– Míchání geopolymerní směsi*

Obr.27 *– Směs ve formách*

Obr.28 *– Vzorek z první sady (neobarvený popelem)*

Obr.29 *– Vzorek z třetí sady (s 5 hm. % popela)*

Obr.30 *– Vzorek ze čtvrté sady (s 10 hm. % popela)*

***Obr. 31** – Porovnání vypěněného vzorku ze sodného (vlevo) a draselného Baucisu*

7.1.3 Spaliny

Spaliny, použité jako příměs do geopolymerů, pochází od polské společnosti PGE Polska Grupa Energetyczna (ekvivalent českého ČEZu) konkrétně z elektrostatického odlučovače pevných částic v tepelné elektrárně. Podle analýzy provedené na TUL je tvořen především uhlíkem ve formě grafitu, dále obsahuje například kyslík, vápník či železo, pravděpodobně ve formě oxidů (viz. tabulka 6).

Tyto spaliny jsou v tepelných elektrárnách produkovány ve velkém množství a mají zápornou cenu (platí se za jejich odběr). Jejich použití jako plnidla do geopolymerů by jednak zlevnilo jejich výrobu, jednak by fakticky sloužilo jako depozice spalin do „earthen like materiálu“, a jednak by mohlo sloužit jako barvivo, neboť většina geopolymerů je bez přísad šedá (viz. obrázky 28,29 a 30).

***Tabulka 6** - Složení spalin v hmotnostních procentech*

Prvek	Wt%
C	76,89
O	7,41
Fe	5,16
Ca	4,75
Si	1,38
S	1,35
Al	1,02
Mg	0,88
Cl	0,53
W	0,25
K	0,16
Na	0,11
P	0,1

7.2 Zařízení pro plazmatickou úpravu povrchu Piezobrush PZ2

Přenosné zařízení pro generování nízkoteplotního atmosférického plazmatu využívající technologii přímého piezoelektrického výboje (PDD), jež má velmi vysokou hustotu energie a umožňuje vytvářet silné elektrické pole i z nízkého vstupního napětí a příkonu, díky čemuž je zařízení značně miniaturizováno. Plazma vytváří přímo z atmosféry, i když je možné použít i specifický pracovní plyn, a odvádí jej do pracovního prostoru pomocí integrovaného ventilátoru. Zařízení lze s adaptérem napájet ze sítě, jeho maximální příkon je 30 W a vytvářené plazma nepřesahuje teplotu 50°C.

Zařízení je dodáváno se třemi druhy trysek: Standard Nozzle, pro většinu běžných aplikací a úpravu nevodivých povrchů, Near-field nozzle, pro úpravu vodivých povrchů, jako jsou kovy a vodivé polymery (bez použití této trysky hrozí při takové aplikaci poškození zařízení), a Multigas & Needle nozzle, která umožňuje velmi přesnou aplikaci plazmatu a může na ní být připojen přívod pracovního plynu (dusíku, argonu nebo hélia).

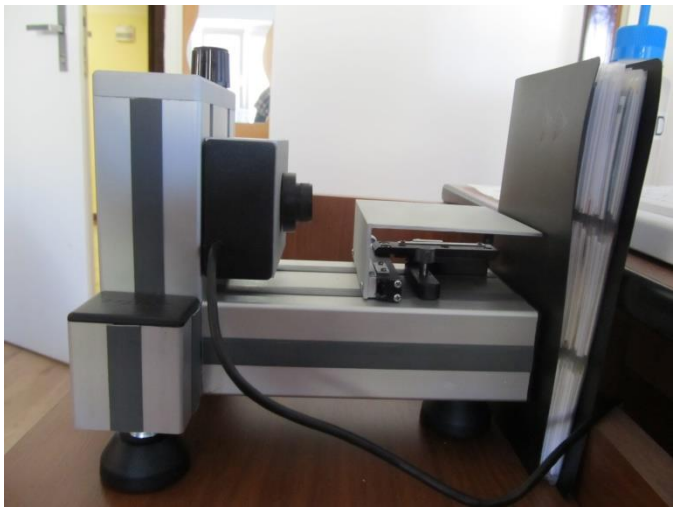
Je možné jej použít pro většinu aplikací, které využívají plazma, jako jsou povrchová aktivace, dezinfekce, čištění, odstraňování zoxidovaných vrstev apod. Vzhledem k jednoduchému použití a malé velikosti je zařízení ideální pro výzkumné a výukové účely, nicméně díky nemožnosti upravovat velkou plochu najednou (typická šířka, kterou je zařízení schopno upravovat, se pohybuje mezi 20 a 35 mm) je nevhodné pro většinu průmyslových využití.

Obr. 32 *– Piezobrush PZ2 použitý pro experimenty*

Obr. 33 *– Povrchová úprava geopolymeru (near-field nozzle)*

7.3 Měření kontaktního úhlu a rychlosti vsakování kapky

Měření pomocí kapkové metody probíhalo na přístroji Surface Energy Evaluation System, kde je přisedlá kapka zaznamenávána digitální kamerou a obraz je zpracováván v softwaru, jež měří velikost kontaktního úhlu, a též umožňuje i výpočet volné povrchové energie na základě nejpoužívanějších metod (Wu, Kwok-Neumann, Li-Neumann, Owens-Wendt-Rable-Kaeble, Lifshitz-van der Waals/acid-base, atd.).



Obr. 34 *– Surface Energy Evaluation System*

7.4 Experimentální postup

Z každé sady připravených a rozřezaných vzorků bylo vybráno několik vzorků pro provádění povrchových úprav, konkrétně pro plazmatickou úpravu pomocí Piezobrush PZ2, pro

natření lakem Revacryl a pro obojí, přičemž vždy byl upraven jak povrch, tak řez. Vzhledem k tomu, že při použití standardní trysky docházelo k elektrickým výbojům do materiálu, což naznačovalo, že jsou geopolymerní vzorky vodivé, byla použita near-field tryska, která je přímo určená pro upravování vodivých materiálů (především kovů). Zbytek vzorků byl ponechán pro měření povrchových vlastností samotného neupraveného povrchu či řezu.

Vzorky, určené pro zkoušení vlastností neupraveného povrchu, byly očištěny textilem a následně testovány na přístroji Surface Energy Evaluation Systém, kde byl měřen povrchový úhel nanesené kapky o objemu 3,5 µl, přičemž měření probíhalo po dobu dvou minut po dvacetisekundových intervalech. Vyřazeny byly pouze ty pokusy, u kterých došlo k velmi rychlému vsáknutí kapky nebo k její nezvyklé deformaci, což naznačovalo poškození povrchu. Vlastnosti na řezu byly měřeny pouze po sekundových intervalech, neboť se na něm kapka velmi rychle vsakovala.

Vzorky, určené pro zkoušení vlastností povrchu upraveného plazmatem, byly očištěny textilem a následně upraveny atmosférickým plazmatem, přičemž každá část jejich povrchu byla upravována dvakrát. Následně byly testovány, přičemž kapka byla snímána po sekundových intervalech, neboť se na plazmatem upraveném povrchu i řezu velmi rychle vsakovala.

Vzorky, určené pro zkoušení vlastností povrchu pokrytého lakem, byly tímto lakem potřeny, aby se vytvořila souvislá vrstva, a následně ponechány k uschnutí. Poté byl měřen povrchový úhel po dobu 7 minut po minutových intervalech.

Vzorky, určené pro zkoušení vlastností povrchu upraveného plazmatem a pokrytého lakem, byly upraveny jak plazmatem, tak lakem, podle postupu zmíněného výše, a následně byl měřen povrchový úhel po dobu sedmi minut po minutových intervalech.

Povrchové úhly byly měřeny přímo v softwaru přístroje, přičemž každý úhel byl změřen třikrát a pro další zpracování byl použit aritmetický průměr získaných úhlů.

8 Výsledky měření a diskuze

8.2 Zhodnocení jednotlivých sad

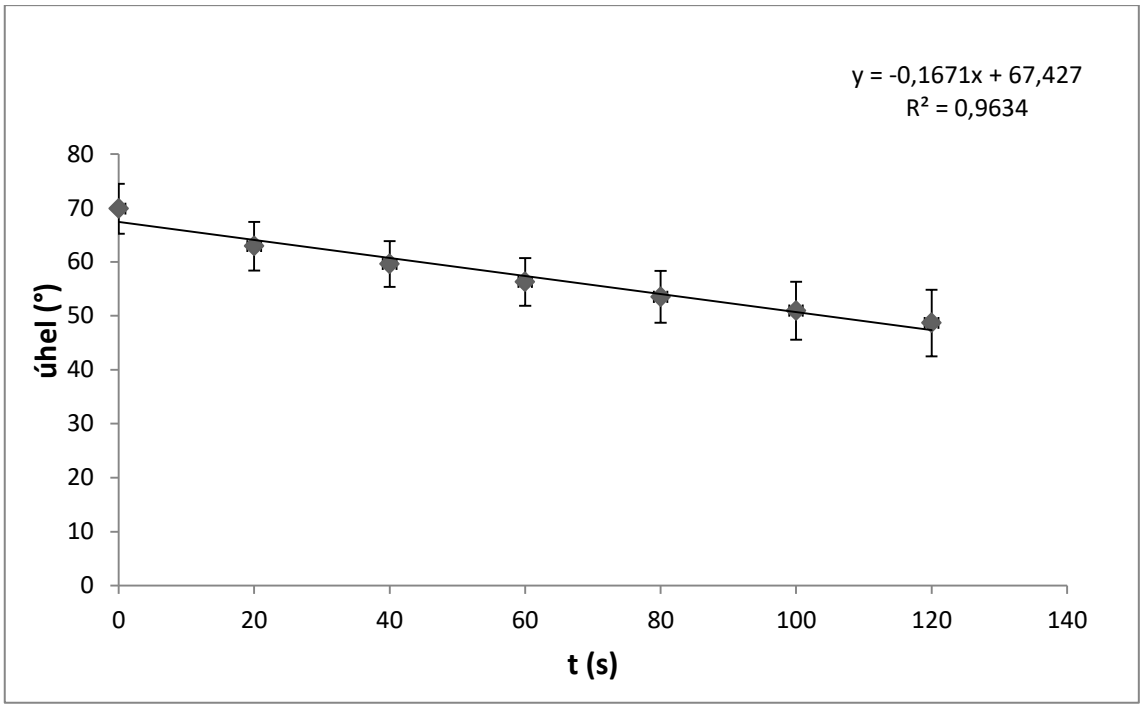
8.2.1 – Sada 1 (s čedičovými vlákny), kompaktní

8.2.1.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch kompaktních vzorků s čedičovými vlákny se při aplikaci kapky jevil jako poměrně hydrofobní, díky průměrné hodnotě počátečního úhlu 69,86°, nicméně kapka se následně začala vsakovat, jak ukazovalo rychlé klesání kontaktního úhlu (s průměrnou rychlostí 0,1765 stupně za sekundu) a viditelné ztmavnutí v místě aplikace kapky po jejím otření. Samotný geopolymer tohoto druhu tedy nebyl voděodolný. U měření byla vypočítána vysoká směrodatná odchylka, povrch vláknitého geopolymeru se tedy zformoval silně nesourodě. Hodnota úhlu v t=0 je také výrazně vychýlená od lineární spojnice trendu, její zkušební odstranění zvedlo hodnotu spolehlivosti lineární spojnice trendu na R^2=0,9942, je tedy možné, že ze začátku se kapka vsakovala rychleji díky odlišným vlastnostem povrchové vrstvy, po jejímž nasycení probíhalo vsakování pomaleji.

Tabulka 7 *- Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 1*

t (s)	Úhel (°)										Průměr	Odchylka
0	62,6	74,7	75	89,6	75,4	68,7	69,8	63	59,5	60,3	69,86	9,25
20	51,7	69,8	70,7	76,7	70	64,9	64,2	54,7	53,2	53,3	62,92	9,03
40	46,3	64,5	66,3	72,7	65	64,1	61,3	53,2	50,7	52	59,61	8,48
60	40,8	58,9	63,6	69,5	62	61,6	59,3	49,4	48,6	49,1	56,28	8,84
80	34,8	55	61,8	67	59,3	60,7	56,3	47,8	46,4	46	53,51	9,64
100	29,3	49,2	60,3	65,5	58,1	59,8	53,8	45,4	44	44,2	50,96	10,71
120	22,4	45,1	59,5	65	56,4	58,7	51,9	43,7	41,9	42,2	48,68	12,34



Graf 1 *– Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 1, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.1.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Jak neupravený řez, tak plazmatem upravený povrch a řez vykazovaly silnou nasákavost, kapka byla zřetelná a měřitelná maximálně po dobu několika sekund, u plazmatem upraveného řezu dokonce byla dokonce zachycena jen jednou.

Tabulka 8 *- Řez a plazmatem upravený povrch kompaktních vzorků ze sady 1*

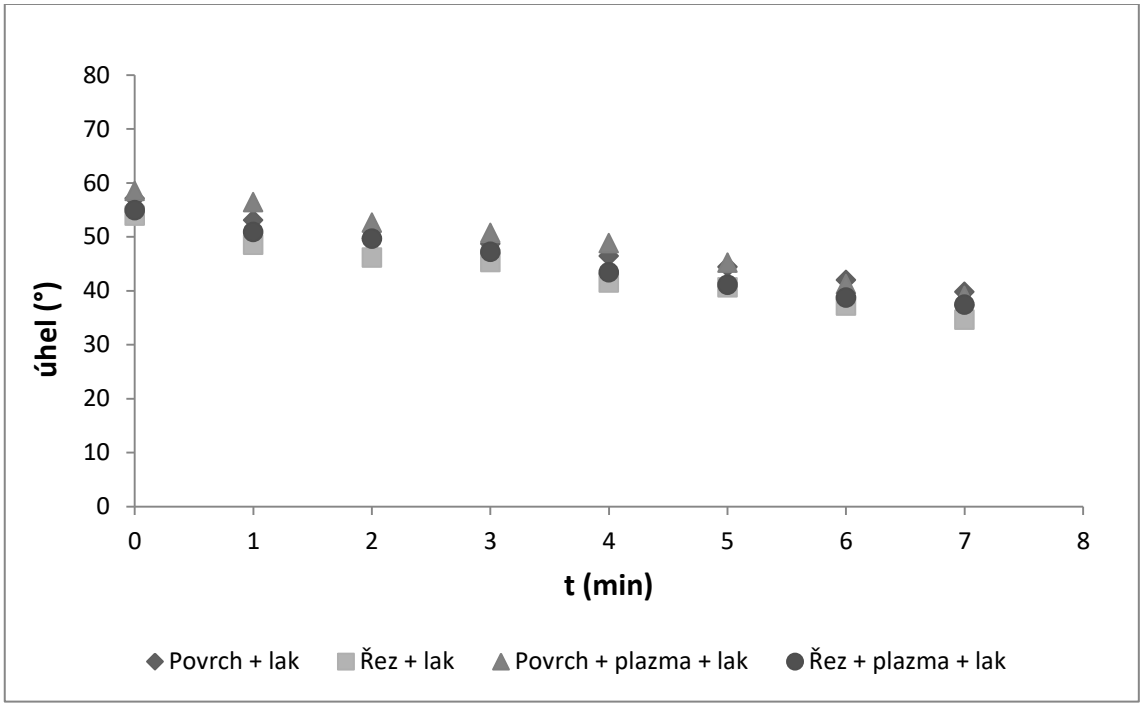
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	8,8	12,4	3,2
1	6	10,6	-
2	4,8	4,7	-

8.2.1.3 Vzorky upravené lakem

Ve všech čtyřech případech měly vzorky podobné povrchové vlastnosti dané vrstvičkou laku, která se při aplikaci zformovala bez problémů. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 9** - Kompaktní vzorky ze sady 1 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	57,1	53,9	58,5	54,9
1	53,1	48,5	56,4	50,9
2	49,7	46,1	52,6	49,6
3	48,7	45,3	50,7	47,2
4	46,4	41,5	48,8	43,4
5	44,4	40,6	45,2	41,1
6	42	37,2	41,2	38,7
7	39,8	34,6	39	37,4



***Graf 2** – Kompaktní vzorky ze sady 1 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

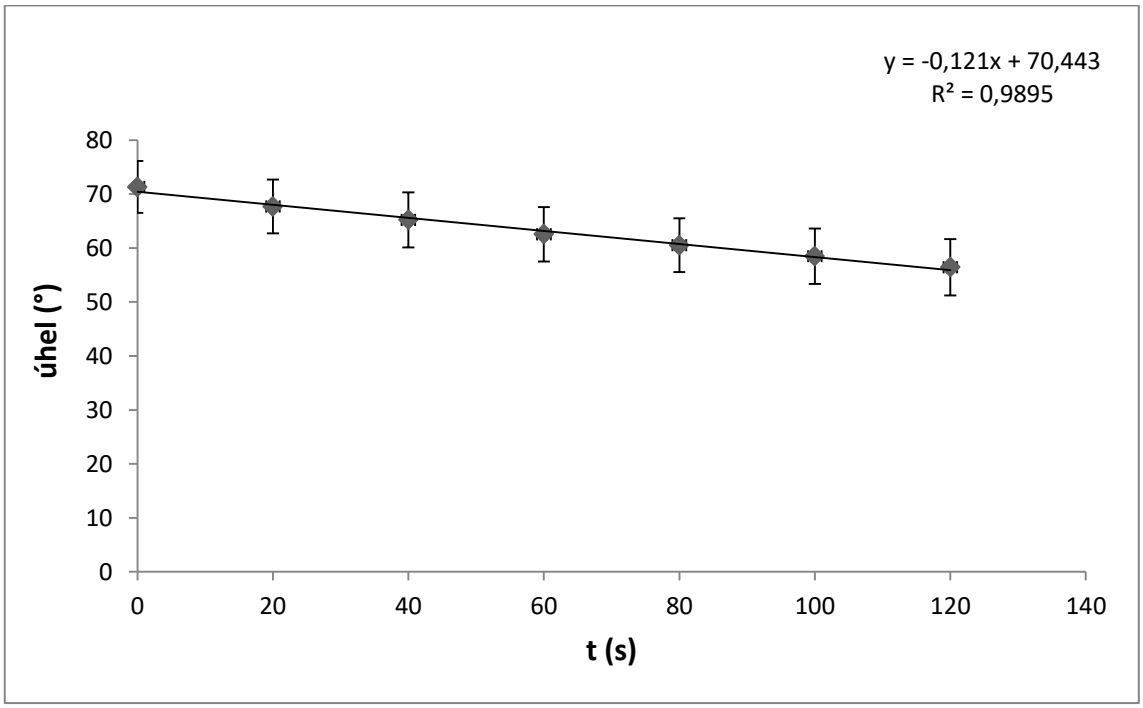
8.2.2 – Sada 1 (s čedičovými vlákny), vypěněné.

8.2.2.1 Neupravený povrch

Stejně jako u kompaktních vzorků byl u vypěněných vzorků s vlákny vysoký počáteční úhel (průměrně 71,32°) a stejně tak se kapka rychle vsakovala s průměrnou rychlostí 0,124 stupně za sekundu. Vypěněný geopolymer s čedičovými vlákny tedy též není sám o sobě voděodolný. Směrodatná odchylka měření byla velmi vysoká, což ukazuje nesourodě zformovaný povrch. První hodnota měření je také mírně vychýlená od lineární spojnice trendu, její zkušební odstranění zvýšilo hodnotu spolehlivosti na hodnotu $R^2 = 0,9965$.

***Tabulka 10** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 1*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	70,7	75,8	56,3	64,4	77,4	76,4	77,5	82	78,1	54,6	71,32	9,63
20	64,2	72,2	51,2	63,4	74,6	72,7	74,9	78,9	74,1	50,9	67,71	9,98
40	61,8	69,7	48,4	60,1	72,5	72,5	70,9	76,8	71,3	48,2	65,22	10,22
60	58	65,1	46	58,4	70,6	70,6	68,4	75,1	67	46,4	62,56	10,11
80	56,4	64	43,9	53,9	68	68,8	66,6	72	66	45,7	60,53	9,96
100	55,2	62	41,2	51,5	65,7	67,3	64,8	69,5	64,7	43	58,49	10,22
120	52,8	61	38,6	49,6	62,9	65,3	62,8	68	62,6	40,8	56,44	10,41



***Graf 3** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 1, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.2.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vypěněné vzorky vykazovaly na řezu velmi vysokou nasákavost, kapku se nepodařilo zachytit u neupraveného vzorku i vzorku upraveného plazmatem. U plazmatem upraveného povrchu se kapku podařilo zachytit pouze jednou.

***Tabulka 11** - Řez a plazmatem upravený povrch vypěněných vzorků ze sady 1*

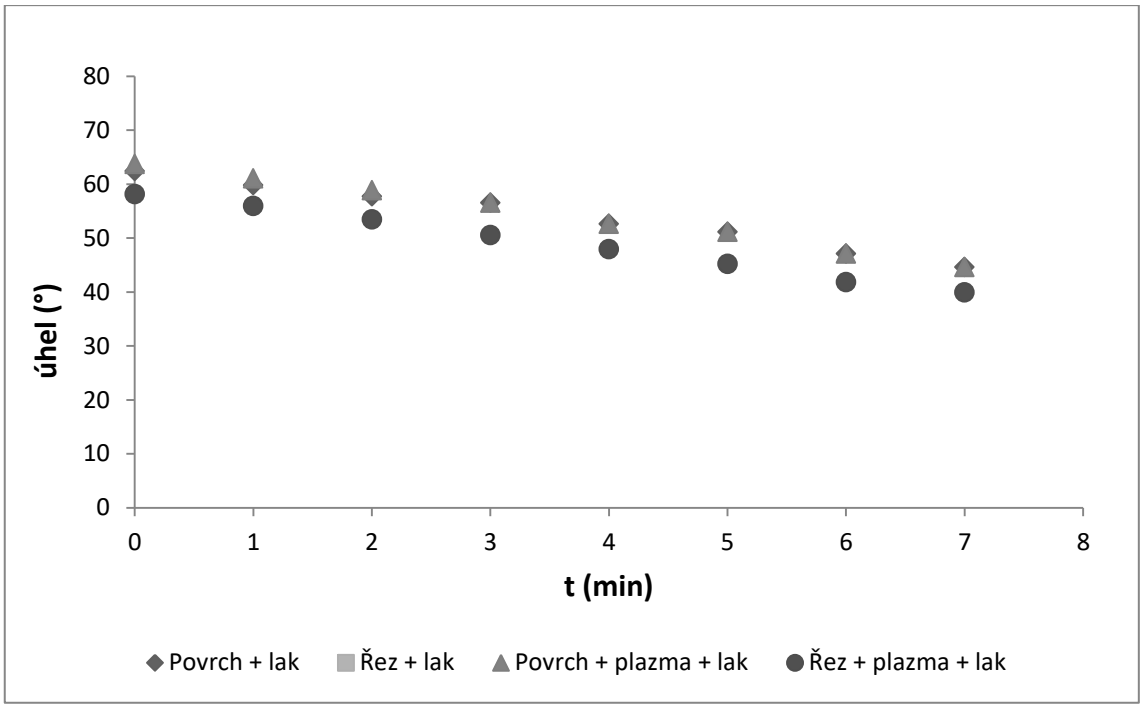
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	-	16,6	-
1	-	-	-
2	-	-	-

8.2.2.3 Vzorky upravené lakem

Stejně jako u kompaktních vzorků lak vyrovnal vlastnosti povrchu a zabránil vsakování do geopolymeru. Vrstva laku se též vytvořila bez problémů. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a neodpovídal vsakování do materiálu.

***Tabulka 12** – Vypěněné vzorky ze sady 1 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	62,4	65,4	63,7	58,1
1	59,8	62,7	61	55,9
2	57,7	60,8	58,8	53,4
3	56,5	57,7	56,5	50,5
4	52,6	55,6	52,6	47,9
5	51,1	53	51,1	45,2
6	47,1	51,2	47,1	41,8
7	44,6	47,1	44,6	39,9



***Graf 4** – Vypěněné vzorky ze sady 1 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.3 – Sada 2 (bez speciálních přísad), kompaktní

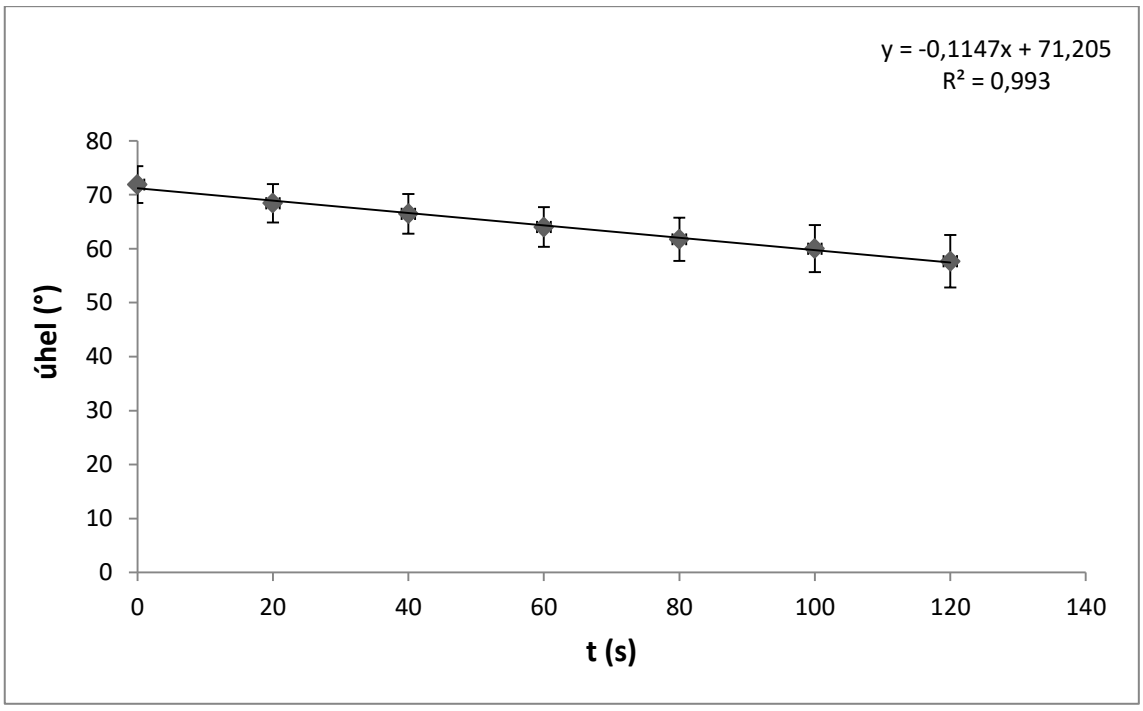
8.2.3.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch kompaktních vzorků bez speciálních přísad se při aplikaci kapky jevil jako poměrně hydrofobní, díky průměrné hodnotě počátečního úhlu 71,9°, nicméně kapka se následně začala vsakovat, jak ukazovalo rychlé klesání kontaktního úhlu (s průměrnou

rychlostí 0,1185 stupně za sekundu) a viditelné ztmavnutí v místě aplikace kapky po jejím otření. Samotný geopolymer tohoto druhu tedy nebyl voděodolný. U měření byla vypočítána značná směrodatná odchylka, která však byla výrazně nižší než u kompaktních vzorků s čedičovými vlákny, povrch geopolymeru bez speciálních přísad se tedy zformoval nesourodě. U této sady nebyla první průměrná hodnota kontaktního úhlu výrazně vychýlená od lineární spojnice trendu a hodnota spolehlivosti byla vysoká i bez jejího odstranění, které celkovou hodnotu spolehlivosti snížilo.

Tabulka 13 *- Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 2*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	78,3	79,4	72,9	60	80,1	62	73,8	69,3	69,9	73,3	71,9	6,84
20	75,3	76,6	68	56,2	77,6	59,5	66,7	66,8	65,6	72	68,43	7,10
40	73,7	74,8	65,4	54,3	77,6	58,4	65,4	63,6	62,5	69	66,47	7,39
60	73,2	72,4	64,2	51,2	72,4	57,1	64	60,8	57,9	67,1	64,03	7,41
80	72,2	71,3	61,3	50,1	70,6	53,8	62	57,1	53,4	65,7	61,75	8,06
100	71,2	69,6	59,6	48,7	69,8	51,1	61,1	53,8	50,2	65	60,01	8,70
120	70,3	67,9	55,4	46,1	68,7	48,7	59,6	48,3	47,5	64,3	57,68	9,69



Graf 5 *- Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 2, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.3.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Jak neupravený řez, tak plazmatem upravený povrch a řez vykazovaly silnou nasákavost. U řezu a plazmatem upraveného povrchu se ji podařilo změřit pouze jednou, u plazmatem upraveného řezu vůbec nebyla zachycena.

***Tabulka 14** - Řez a plazmatem upravený povrch kompaktních vzorků ze sady 2*

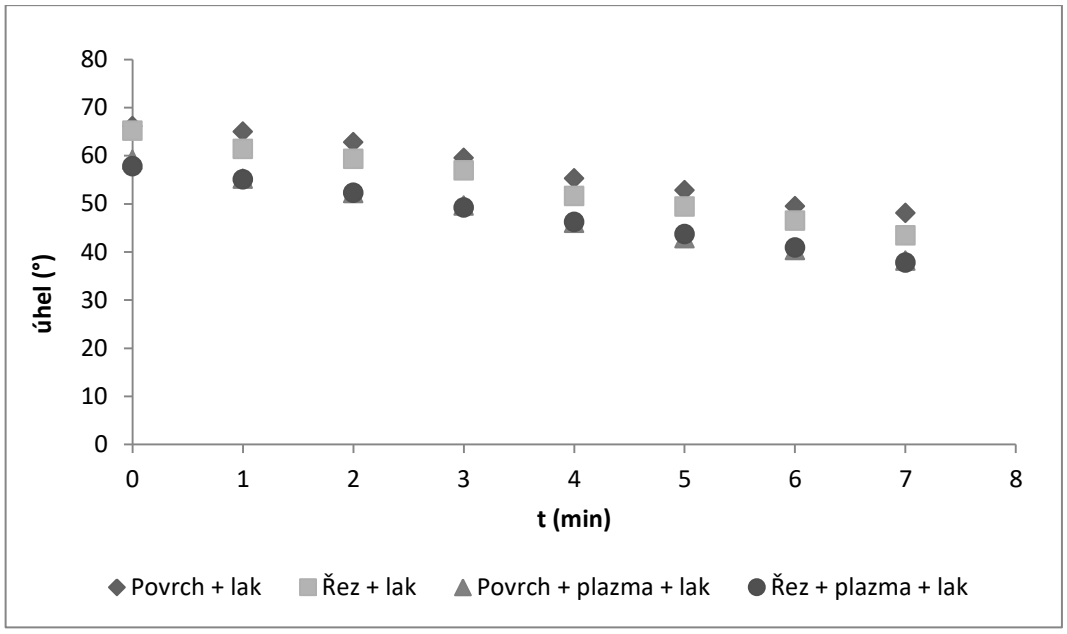
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	9,7	9,6	-
1	-	-	-
2	-	-	-

8.2.3.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti, byť vzorky upravené plazmatem vykazují mírně menší povrchový úhel. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 15** – Kompaktní vzorky ze sady 2 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	66,1	65,2	59,1	57,8
1	65	61,4	55,2	55,1
2	62,8	59,3	52,2	52,3
3	59,5	56,9	49,6	49,2
4	55,3	51,6	46	46,2
5	52,8	49,4	42,8	43,7
6	49,5	46,5	40,4	40,9
7	48,1	43,4	38,2	37,8



***Graf 6** - Kompaktní vzorky ze sady 2 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

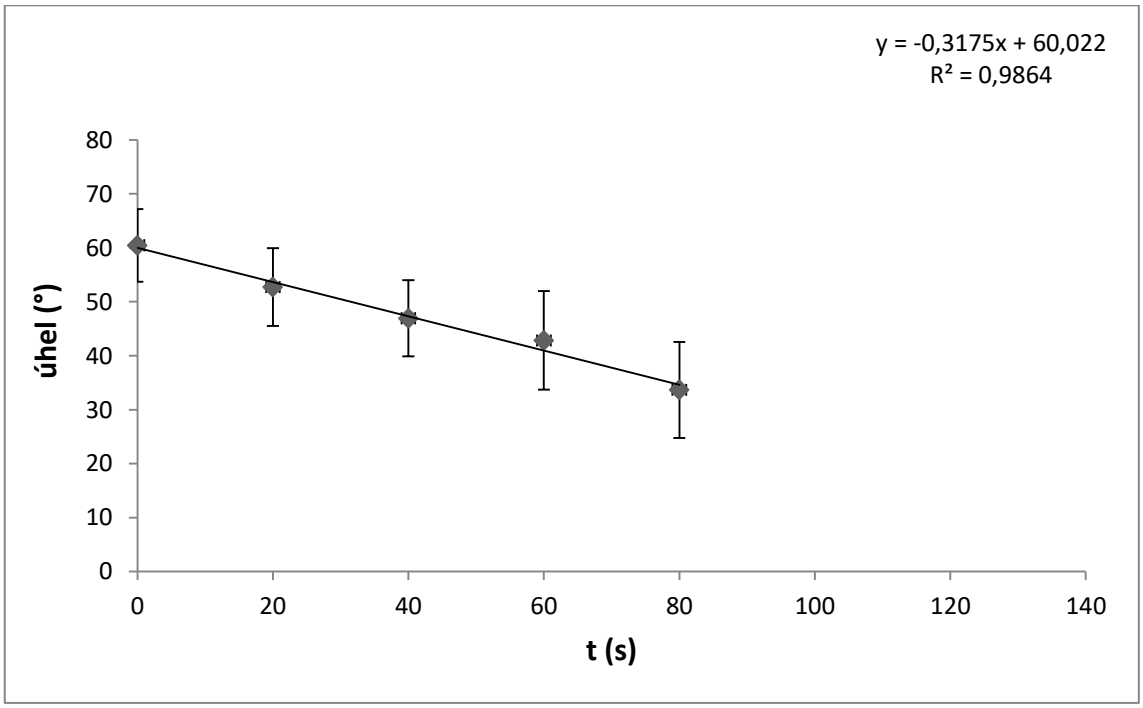
8.2.4 – Sada 2 (bez speciálních přísad), vypěněné.

8.2.4.1 Neupravený povrch

Povrch vypěněných vzorků se jevil jako poměrně hydrofobní, byť ve srovnání s kompaktními vzorky z této sady byl průměrný počáteční úhel nižší (60,46°). Nicméně tato měření měla velmi vysokou odchylku (u počátečního úhlu rovnou 13,45), která se navíc s přibývajícím časem zvyšovala. 4 z 10 měření také nemohla být dokončena, neboť se kapka zcela vsákla před dosažením 120 sekund, v grafu se tady počítá pouze s časem do 80 sekund. Průměrná rychlost vsakování kapky byla 0,342 stupně za sekundu. To svědčí o velmi silně nesourodém povrchu, který měl navíc patrně i mnohé vady (trhliny apod.). Vypěněný geopolymer bez speciálních přísad tedy není sám o sobě voděodolný. Počáteční hodnota povrchového úhlu se nevychylovala od lineární spojnice trendu, nicméně hodnota spolehlivosti i tak byla kvůli vysokým odchylkám měření nízká.

***Tabulka 16** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 2*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	60,2	72,4	61,3	61,2	47,9	55	56,5	45,4	52,7	92	60,46	13,45
20	48,7	62,8	52,1	51,1	44,5	49,4	47,9	35,9	45,8	89,1	52,73	14,44
40	39,3	50,3	48,7	48,8	41,4	46,4	44,1	29,6	37,9	82,9	46,94	14,11
60	27,9	69,8	38,6	38,6	36,2	42,8	40,9	22,8	30,2	80,4	42,82	18,28
80	20	26,8	33,5	33,5	34,1	38,9	35,2	12,3	23,6	78,8	33,67	17,82
100	-	-	28	28	32,3	35,1	33,9	-	-	76,6	-	-
120	-	-	22,1	22,1	28,9	30,8	25,8	-	-	73	-	-



***Graf 7** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 2, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.4.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vypěněné vzorky vykazovaly na řezu velmi vysokou nasákavost, kapku se nepodařilo zachytit u neupraveného vzorku i vzorku upraveného plazmatem. U plazmatem upraveného povrchu se kapku podařilo zachytit pouze jednou.

***Tabulka 17** - Řez a plazmatem upravený povrch vypěněných vzorků ze sady 2*

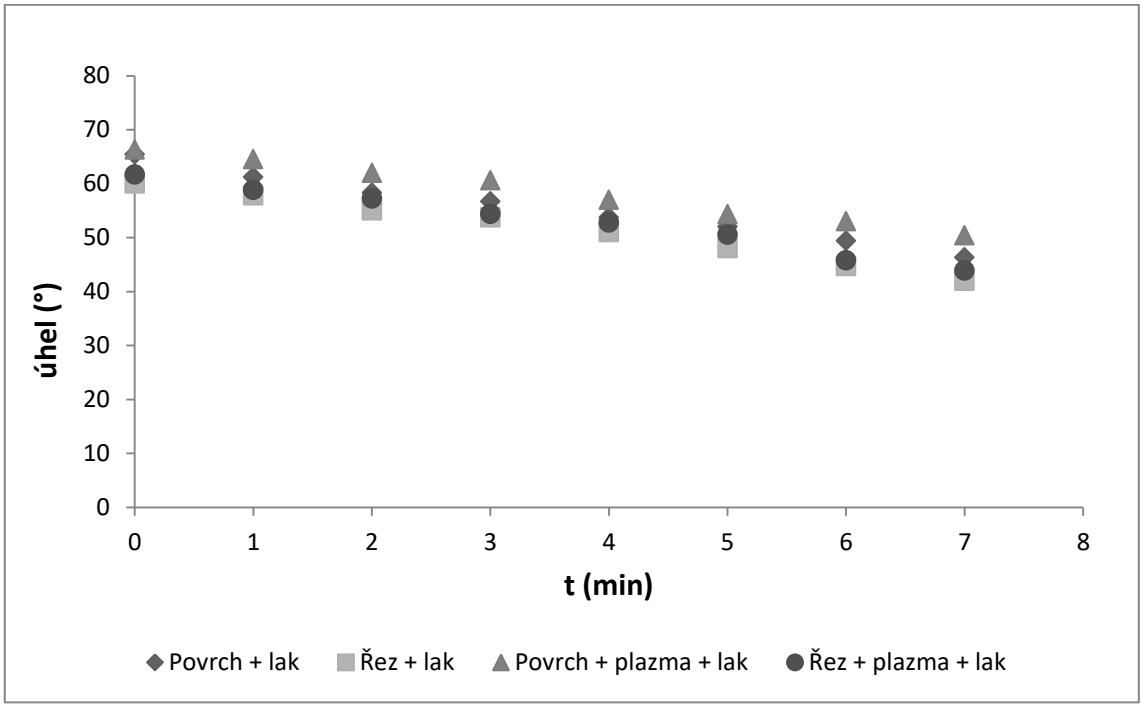
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	-	17	-
1	-	-	-
2	-	-	-

8.2.4.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 18** - Vypěněné vzorky ze sady 2 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	65,4	60	66,3	61,7
1	61,2	57,8	64,5	58,8
2	58,3	55	62	57,2
3	56,7	53,7	60,6	54,4
4	53,7	51	57	52,8
5	52	48	54,3	50,5
6	49,4	44,7	53	45,8
7	46,3	42	50,4	43,9



***Graf 8** - Vypěněné vzorky ze sady 2 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.5 – Sada 3 (s 5% popela), kompaktní

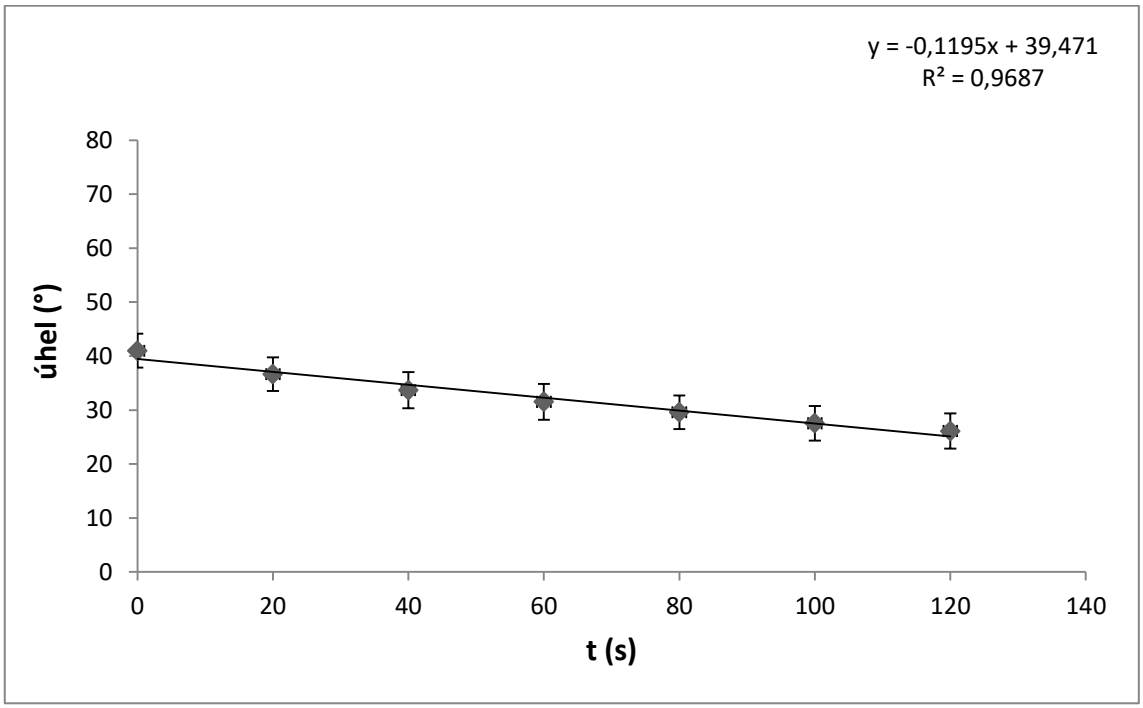
8.2.5.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch kompaktních vzorků s 5% popela se při aplikaci kapky jevil poměrně hydrofilní, díky průměrné hodnotě počátečního úhlu 40,99°. Kapka se následně

vsakovala s průměrnou rychlostí 0,124 stupně za sekundu, přičemž po setření kapky bylo znatelné ztmavnutí. Samotný geopolymer tohoto druhu tedy nebyl voděodolný. U měření byla vypočítána vysoká směrodatná odchylka, která byla srovnatelná s odchylkou vypočtenou u kompaktních vzorků bez speciálních přísad (sada 2). Povrch geopolymeru s popelem se tedy zformoval nesourodě. První hodnota měření byla vychýlená od lineární spojnice trendu a její odstranění vedlo ke zvýšení hodnoty spolehlivosti na hodnotu R^2=0,9888.

Tabulka 19 - *Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 3*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	41,9	50,3	46,7	40,6	34,3	35,2	32,7	44,8	47,7	35,7	40,99	6,28
20	36,5	45,9	44,2	35,8	30,1	32	29	40,7	41,7	30,6	36,65	6,19
40	34,6	43,5	41,5	32,7	27,3	28,7	24,5	38,5	38,5	27	33,68	6,67
60	32	40,7	40,2	30,7	25,2	26,6	23,1	36,4	36,2	24,2	31,53	6,62
80	29,8	38,2	37,5	26,8	23,5	25,1	22,1	34,8	34,6	23,6	29,6	6,2
100	28,1	37	34,8	25,4	22,2	21,8	21	33,2	32,5	19,5	27,55	6,43
120	26,9	35,7	33,9	24,2	19,8	20,3	18,6	30,8	31,6	19,3	26,11	6,54



Graf 9 - *Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 3, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.5.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Kompaktní vzorky vykazovaly na řezu vysokou hydrofilitu, přestože se kapka, na rozdíl od předchozích vzorků, nevsákla okamžitě. Na povrchu i řezu upravených plazmatem se ji podařilo zachytit jen jednou s velmi nízkým povrchovým úhlem, což svědčí o velké nasákavosti.

***Tabulka 20** - Řez a plazmatem upravený povrch kompaktních vzorků ze sady 3*

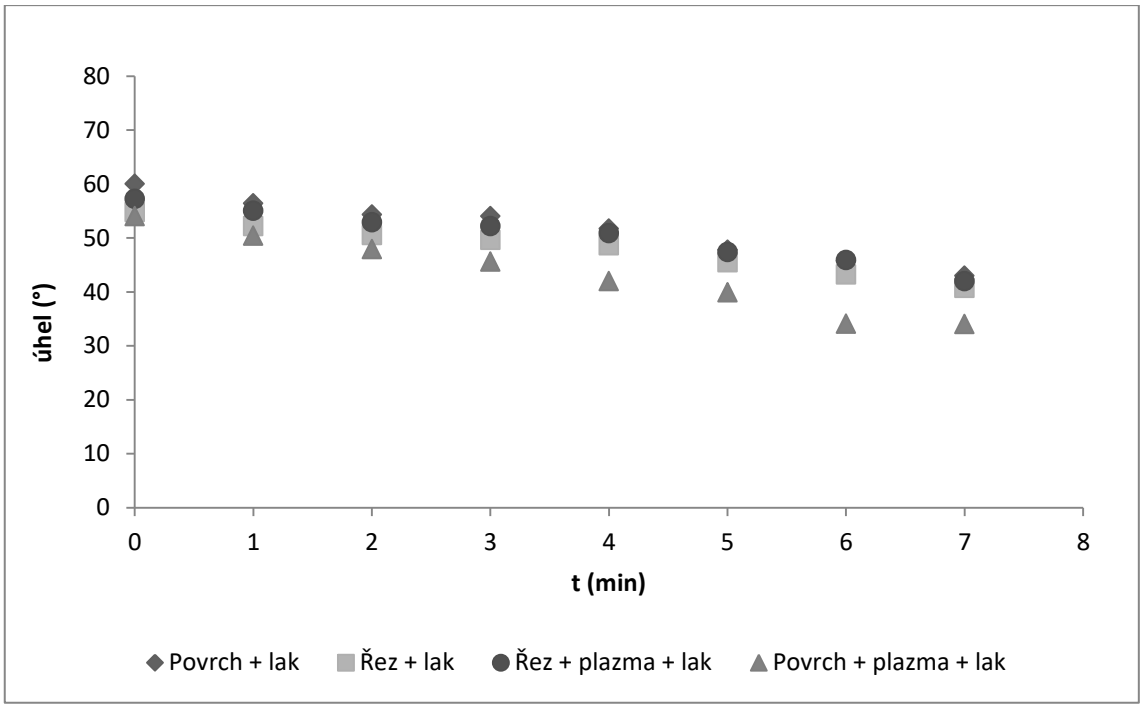
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	16,6	8,2	5
1	13,7	-	-
2	13,1	-	-

8.2.5.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 21** - Kompaktní vzorky ze sady 3 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	60	54,8	54	57,2
1	56,4	52,2	50,4	55
2	54,3	50,5	47,9	52,9
3	54	49,6	45,6	52,2
4	51,7	48,6	42	50,9
5	47,8	45,5	39,9	47,4
6	45,8	43,2	34,1	45,9
7	43	40,7	34	42



Graf 10 *- Kompaktní vzorky ze sady 3 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

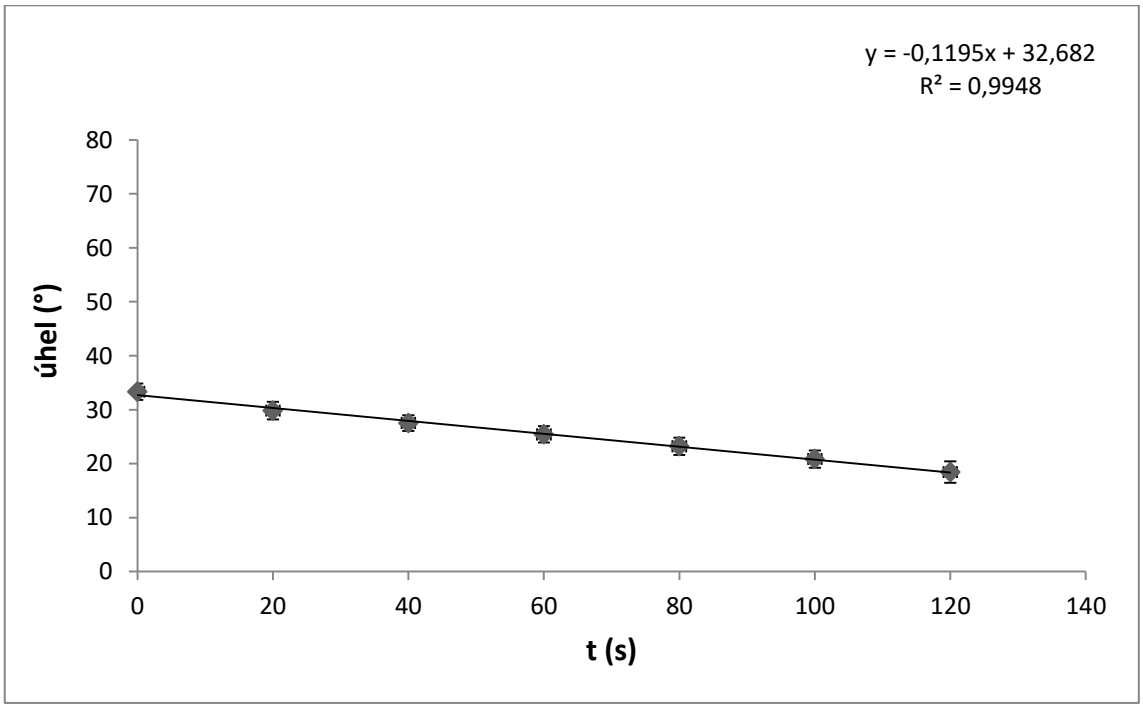
8.2.6 – Sada 3 (s 5% popela), vypěněné

8.2.6.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch vypěněných vzorků s 5% popela se při aplikaci kapky jevil poměrně hydrofilní, díky průměrné hodnotě počátečního úhlu 33,33°. Kapka se následně vsakovala s průměrnou rychlostí 0,124 stupně za sekundu (shodné s kompaktními vzorky z této sady), přičemž po setření kapky bylo znatelné ztmavnutí. Samotný geopolymer tohoto druhu tedy nebyl voděodolný. Vypočítaná směrodatná odchylka byla sice znatelná, přesto mnohem nižší, než u většiny ostatních vzorků. Povrch vypěněného geopolymeru s 5% popela se tedy zformoval nesourodě, byť méně, než u ostatních vzorků. A přestože je hodnota spolehlivosti lineární spojnice trendu velmi vysoká, podle grafu to stále vypadá, že je první průměrná hodnota mírně vychýlená směrem nahoru. Její zkušební odstranění hodnotu spolehlivosti dále zvýšilo na R^2=0,9994.

***Tabulka 22** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 3*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	32,2	35,2	29,3	31,9	35,2	31,3	32,1	32,8	33,1	40,2	33,33	2,98
20	27,6	31	27,7	27,8	32	28,7	27,8	29,5	27,9	38,1	29,81	3,29
40	26,5	28,1	24,7	25,3	31,1	26,2	27,5	27,1	24,9	33,9	27,53	2,92
60	25,1	26,4	22,6	23,7	27,2	24,6	24,9	25,1	21,8	32,7	25,41	3,02
80	21,8	25,2	21,5	21,3	25,6	22,9	22,9	22,4	18,4	30,2	23,22	3,18
100	19,5	22,8	19,7	18	23,4	20,9	19,6	21,5	15,8	27,4	20,86	3,2
120	17,2	19,7	17	16,4	22,3	19,4	16,9	18,6	10,7	26,1	18,43	4,03



***Graf 11** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 3, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.6.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vypěněné vzorky vykazovaly na řezu i na plazmatem upraveném povrchu vysokou nasákavost, kapku se podařilo zachytit pouze jednou. U plazmatem upraveného řezu se kapku nepodařilo zachytit vůbec.

***Tabulka 23** - Řez a plazmatem upravený povrch vypěněných vzorků ze sady 3*

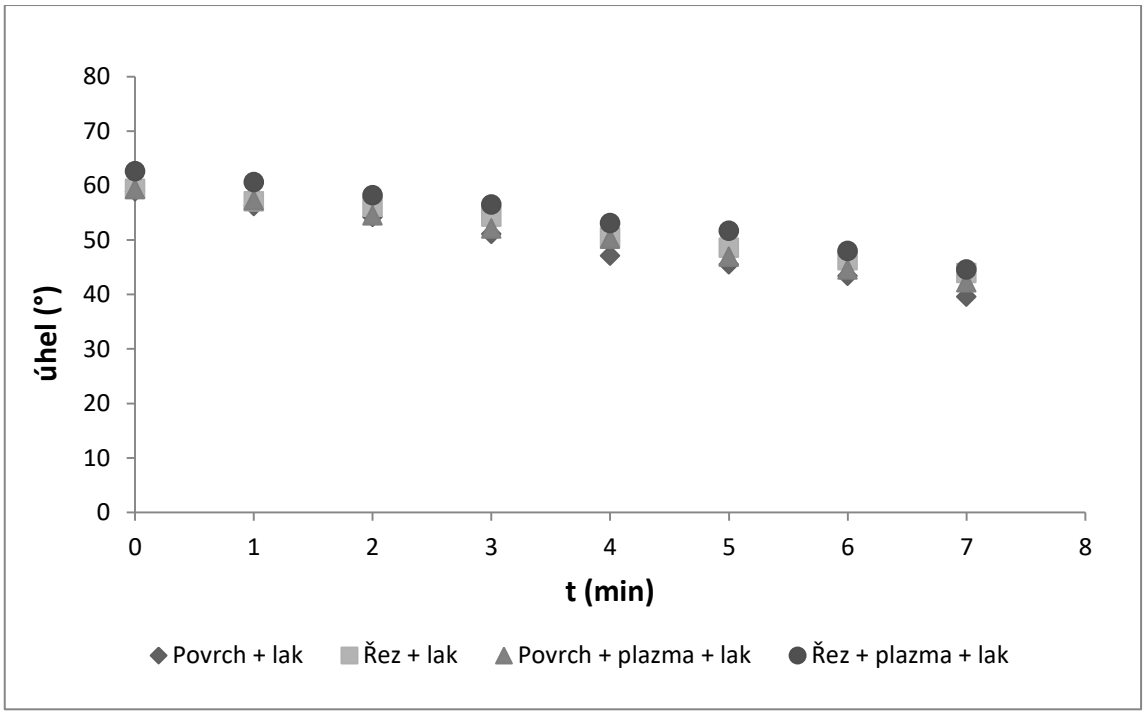
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	12,6	18,3	-
1	-	-	-
2	-	-	-

8.2.6.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

Tabulka 24 - *Vypěněné vzorky ze sady 3 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	58,9	59,4	59,3	62,6
1	56,2	57,1	57,3	60,6
2	54,2	56,1	54,5	58,2
3	51,1	54,3	52,1	56,5
4	47,1	50,5	50,2	53,1
5	45,5	48,6	46,9	51,7
6	43,4	46,3	44,6	48
7	39,6	43,9	42,2	44,6



Graf 12 - *Vypěněné vzorky ze sady 3 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.7 – Sada 4 (s 10% popela), kompaktní

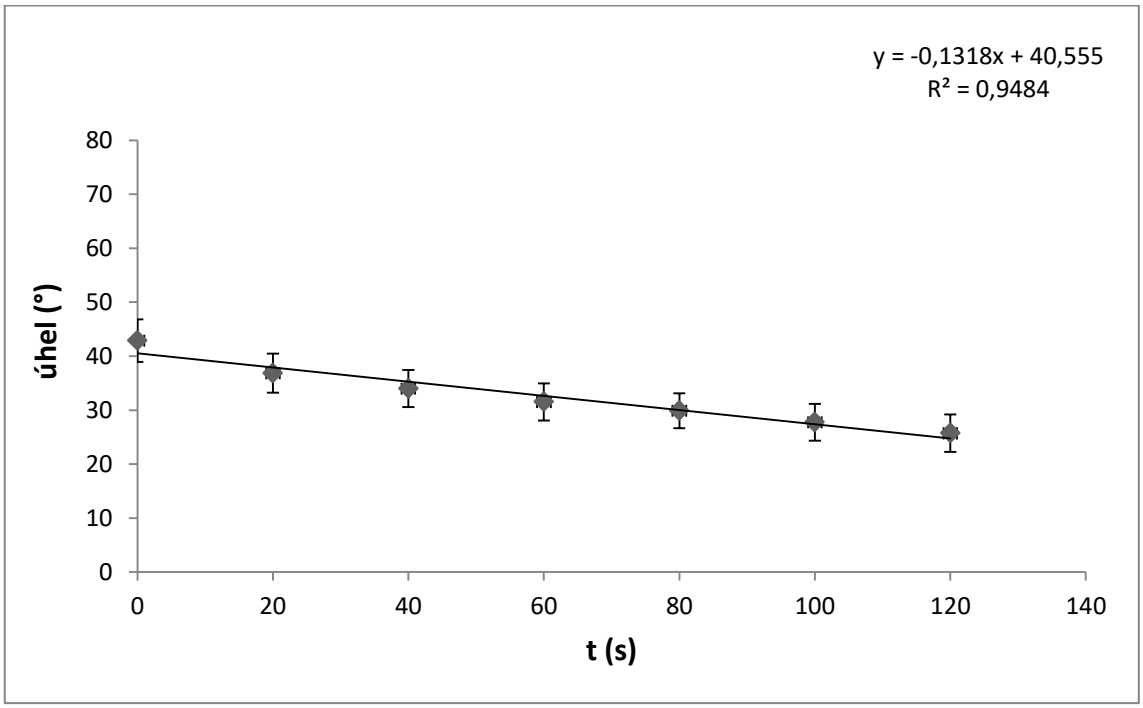
8.2.7.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch kompaktních vzorků s 10% popela se při aplikaci kapky jevil poměrně hydrofilní, s průměrnou hodnotou počátečního úhlu rovnou 42,87°. Kapka se následně začala vsakovat s průměrnou rychlostí 0,143 stupně za sekundu a po jejím setření byl povrch viditelně ztmavlý. Takto připravený geopolymer tedy nebyl sám o sobě voděodolný. U měření byla vypočítána vysoká odchylka, povrch geopolymeru se tedy zformoval silně nesourodě.

U této sady vzorků byla též vypočítána nízká hodnota spolehlivosti lineární spojnice trendu (R^2=0,9484), především díky vychýlené průměrné hodnotě v t=0. Její zkušební odstranění vedlo ke zvýšení hodnoty spolehlivosti na 0,9932.

***Tabulka 25** - Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 4*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	32,8	41,4	45,8	40,6	35,7	39,3	58,4	36,2	51,5	47	42,87	7,88
20	26	34,4	38,7	33,9	31,6	35	51,8	32,3	41,2	43,5	36,84	7,26
40	24,1	30,9	35,2	30,8	28,3	34	48,6	30,5	37,4	40,1	33,99	6,88
60	21,1	27,5	33,6	27,2	27,3	31,2	45,4	28,8	34,6	38,5	31,52	6,86
80	19,8	26,9	32,6	26,2	26,9	29,2	43,6	27,1	30,4	36	29,87	6,45
100	17,2	24,6	29,7	24,1	24,8	28,3	42,5	24,9	26,9	34,5	27,75	6,83
120	15,1	22,8	28	20,6	21,8	26,4	40,8	24,5	25,2	31,9	25,71	6,96



***Graf 13** - Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 4, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.7.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vzorky vykazovaly na řezu vysokou hydrofilitu. Počáteční kontaktní úhel kapky byl velmi nízký a rychle, byť ne okamžitě, se začala vsakovat. Plazmatem upravený povrch a řez byli pak silně nasákavé, kapku se podařilo zachytit jen jednou.

***Tabulka 26** - Řez a plazmatem upravený povrch kompaktních vzorků ze sady 4*

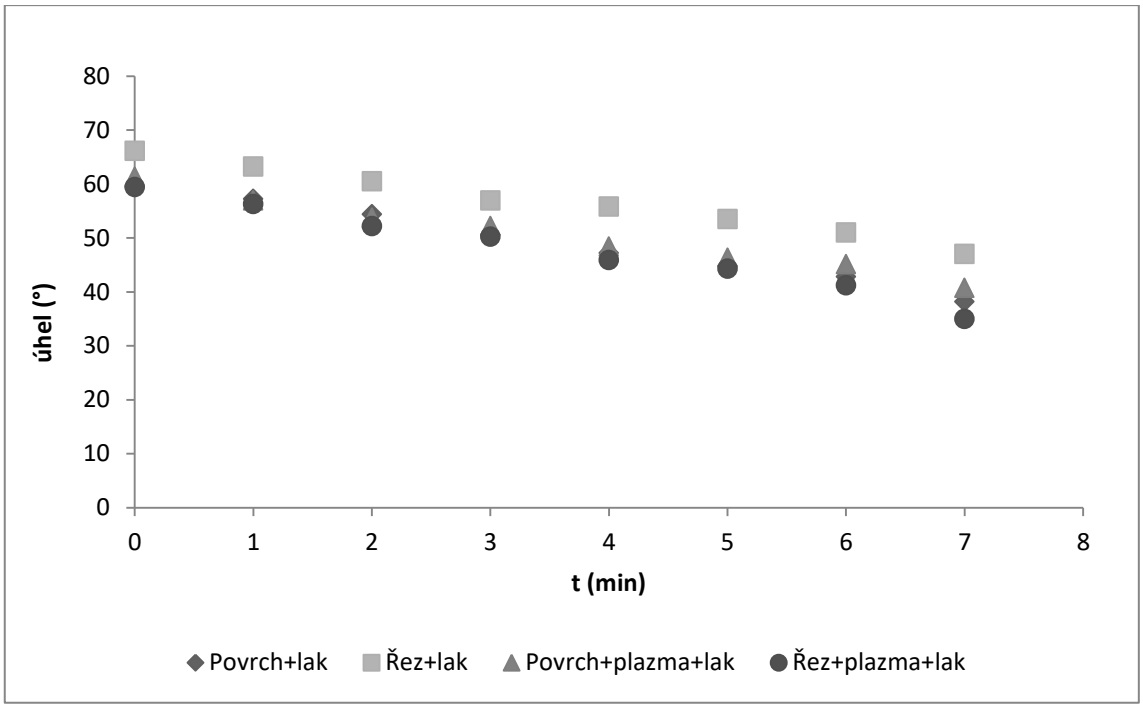
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	15,5	4	1,8
1	11,7	-	-
2	10,2	-	-

8.2.7.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti, kromě samotného lakem upraveného řezu, který měl oproti ostatním vyšší povrchové úhly ve všech časech. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 27** - Kompaktní vzorky ze sady 4 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	59,4	66,1	61,3	59,4
1	57,2	63,2	56,9	56,3
2	54,4	60,5	53,7	52,2
3	50,6	56,9	52,2	50,2
4	47,2	55,8	48,4	45,9
5	44,8	53,5	46,3	44,3
6	42,8	51	45,1	41,2
7	38,2	47	40,7	35



***Graf 14** - Kompaktní vzorky ze sady 4 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

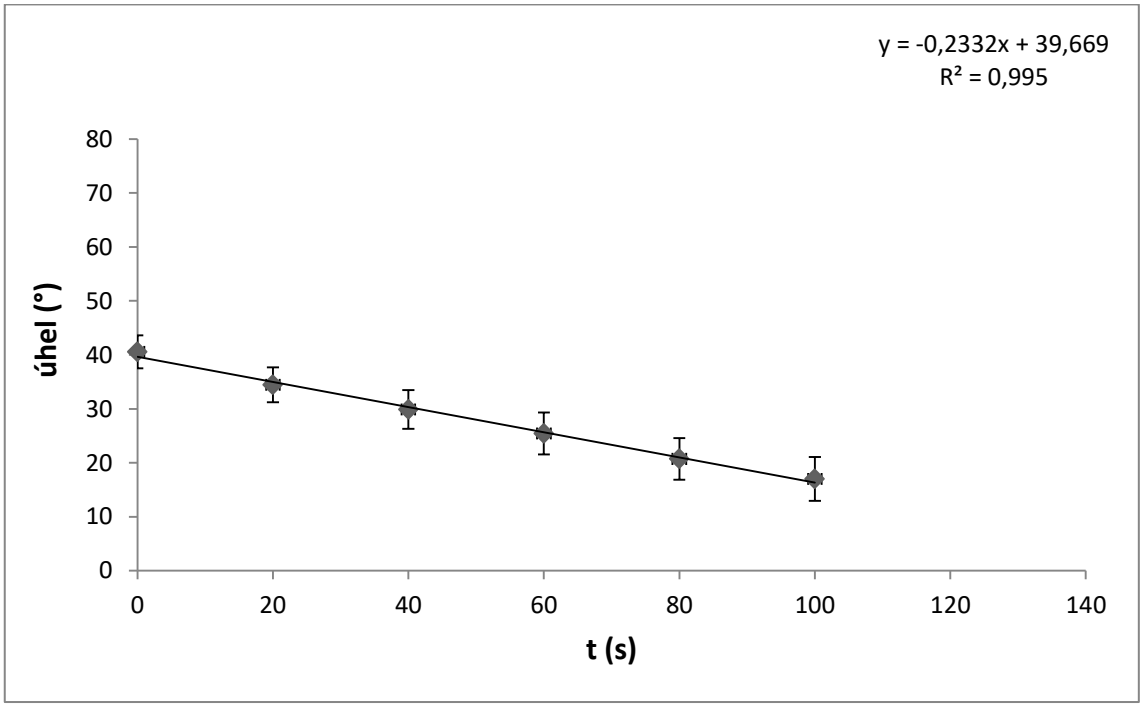
8.2.8 – Sada 4 (s 10% popela), vypěněné

8.2.8.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch vypěněných vzorků s 10% popela se jevil jako poměrně hydrofilní, díky počátečnímu průměrnému povrchovému úhlu 40,55°, a kapka vsakovala rychlostí 0,2353 stupně za sekundu. U dvou vzorků nebylo možné měření dokončit, neboť se kapka zcela vsákla před dosažením 120 sekund. V grafu se tedy počítá pouze s časem do 100 sekund. Směrodatná odchylka měření byla vysoká, i když mnohem nižší, než u vypěněných vzorků bez speciálních přísad, kde též nebyla část měření dokončena, povrch se tedy zformoval nesourodě. Vypěněný polymer tohoto druhu tedy není sám o sobě voděodolný. První průměrná hodnota povrchového úhlu je pouze nepatrně vyšší, než lineární spojnice trendu v daném bodě, její zkušební odstranění zvýšilo hodnotu spolehlivosti též jen nepatrně, na 0,9986.

***Tabulka 28** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 4*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	45,5	50,1	46,7	38,5	31,8	41,4	34,6	38	44,9	34	40,55	6,14
20	36,7	45,5	40,8	30,4	27	35,7	28,7	33,2	40,2	26,2	34,44	6,47
40	33,3	42,2	35,4	27,5	22,4	30,6	22,5	27,8	37	20,2	29,89	7,14
60	28,4	39	30,2	20,5	19,7	24,4	19,3	24,3	34,9	13,5	25,42	7,78
80	25,7	34,7	23,6	17,4	14,9	19,4	14,4	17,9	29,8	9,5	20,73	7,68
100	19,8	32,5	18,8	12,7	13,1	18,3	9,2	15	26,3	4,5	17,02	8,13
120	15,8	27,5	12,2	8,7	10,3	11,4	-	8,1	21,4	-	-	-



***Graf 15** - Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 4, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.8.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vzorky vykazovaly na řezu i na plazmatem upraveném povrchu a řezu vysokou nasákavost. Na řezu se kapku podařilo zachytit dvakrát, na plazmatem upraveném povrchu a řezu pouze jednou, vždy s nízkým povrchovým úhlem.

***Tabulka 29** - Řez a plazmatem upravený povrch vypěněných vzorků ze sady 4*

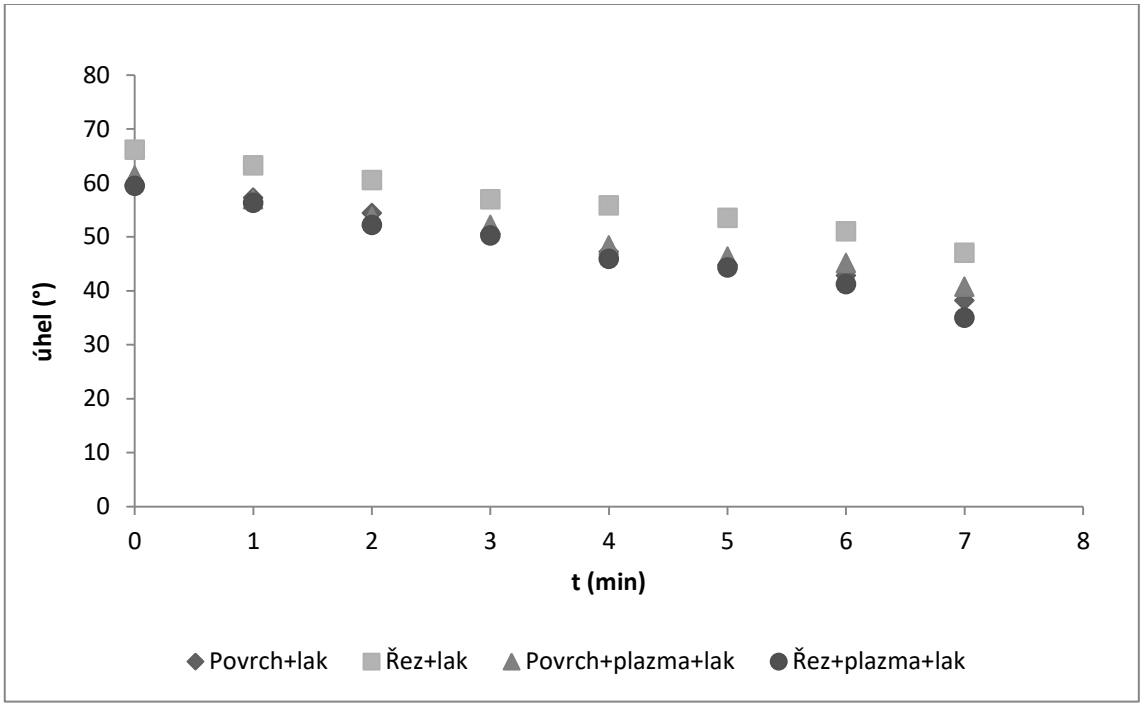
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	16,6	9,9	8,7
1	13,4	-	-
2	-	-	-

8.2.8.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti, kromě lakem upraveného řezu, na kterém byl naměřen ve všech časech nižší povrchový úhel než u ostatních (u kompaktních vzorků byl naopak vyšší). Pokles povrchového úhlu byl pomalý a na vzorcích nebylo znát ztmavnutí.

***Tabulka 30** - Vypěněné vzorky ze sady 4 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	65,1	57,6	64	63,3
1	63,7	56,2	62,5	61,5
2	61,9	53,6	59,7	59,6
3	60,5	49,7	58,4	56,7
4	57,8	47,2	56,3	54,9
5	54	44,3	54,7	52,2
6	52,1	42,5	51,3	49,7
7	49,6	39,7	48,5	47,3



***Graf 16** - Vypěněné vzorky ze sady 4 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

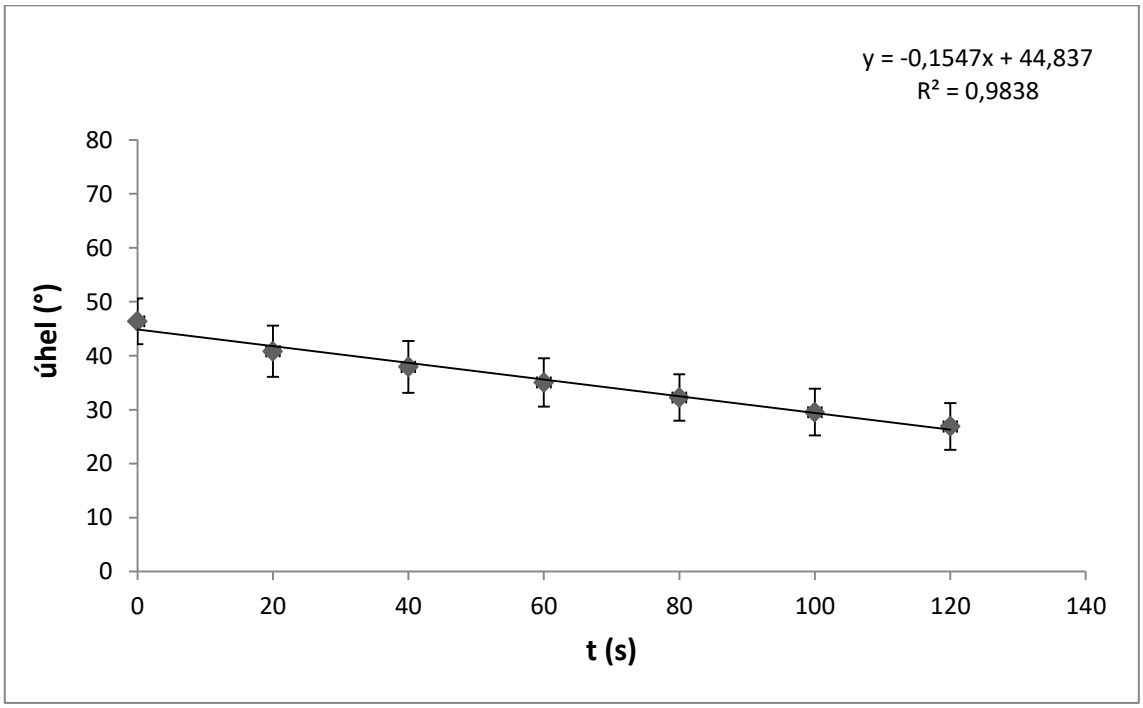
8.2.9 – Sada 5 (draselný Baucis), kompaktní

8.2.9.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch kompaktních vzorků připravených z draselného Baucisu se při aplikaci kapky jevil poměrně hydrofilní, s průměrnou hodnotou počátečního úhlu rovnou 46,37°. Kapka se následně začala vsakovat s průměrnou rychlostí 0,162 stupně za sekundu a po jejím setření byl povrch viditelně ztmavlý. Takto připravený geopolymer tedy nebyl sám o sobě voděodolný. U měření byla vypočítána vysoká směrodatná odchylka, povrch geopolymeru se tedy zformoval silně nesourodě. První průměrná hodnota kontaktního úhlu je vychýlená od lineární spojnice trendu směrem nahoru a její zkušební odstranění zvýšilo hodnotu spolehlivosti na $R^2 = 0,9997$.

***Tabulka 31** - Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 5*

t (s)	Úhel (°)										průměr	odchylka
0	62,8	51,2	34,6	40,8	41,5	46,9	36	47,1	51,8	51	46,37	8,47
20	57,4	45,8	23,7	36,9	36	40,7	31,5	41	47,6	47,6	40,82	9,49
40	54,9	42,8	21,3	35,8	32,6	36,3	29,2	35,1	46,2	45,1	37,93	9,59
60	51,3	37,8	21	32,1	30,7	29,6	27,6	34	42,1	44,4	35,06	8,94
80	46,5	34,9	19,4	28	29,7	24,8	25,7	30,7	40	42,9	32,26	8,65
100	43,4	32	18,9	27,5	27,7	19,4	24,8	23,3	37,1	41,3	29,54	8,68
120	39,6	27,7	17,9	24,4	26,3	15,9	23,1	19,3	34,6	40,2	26,9	8,68



***Graf 17** - Neupravený povrch kompaktních vzorků ze sady 5, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.9.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Vzorky vykazovaly na řezu i na plazmatem upraveném povrchu a řezu vysokou nasákavost. Na řezu a plazmatem upraveném povrchu se kapka velmi rychle vsakovala a na plazmatem upraveném řezu se jí podařilo zachytit jen dvakrát.

***Tabulka 32** - Řez a plazmatem upravený povrch kompaktních vzorků ze sady 5*

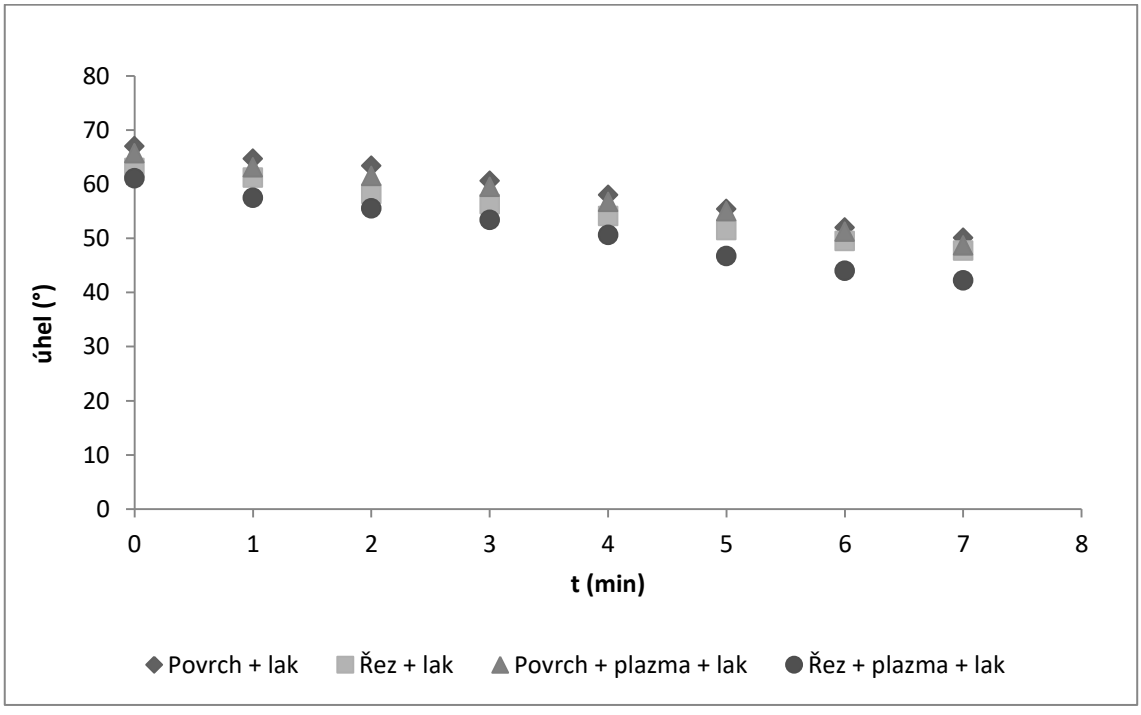
t(s)	řez	povrch+plazma	řez+plazma
0	10,7	11,2	7,1
1	4	5,2	4,3
2	2,9	4,3	-

8.2.9.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky měly po aplikaci laku podobné vlastnosti, kromě samotného lakem upraveného řezu, který měl oproti ostatním vyšší povrchové úhly ve všech časech. Vrstva laku se na všech vzorcích zformovala bez problému. Pokles povrchového úhlu byl velmi pomalý a odpovídal spíše vypařování nežli vsakování. Při následné kontrole nebylo znát ztmavnutí povrchu, které by naznačovalo vsáknutí vody.

***Tabulka 33** - Kompaktní vzorky ze sady 5 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	řez+lak	povrch+plazma+lak	řez+plazma+lak
0	67	63	65,7	61,1
1	64,7	61,2	63,1	57,5
2	63,4	58,2	61,5	55,5
3	60,6	56,3	59,5	53,4
4	58	54,1	56,7	50,6
5	55,4	51,5	55	46,7
6	52	49,5	51,2	44
7	50,1	47,7	48,7	42,2



***Graf 18** - Kompaktní vzorky ze sady 5 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.2.10 – Sada 5 (draselný Baucis), vypěněné

8.2.10.1 Neupravený povrch

Neupravený povrch draselných vzorků byl velmi nasákavý sám o sobě, obvyklý postup měření (po 20 sekundových intervalech po dobu 120 sekund) se nedal použít, neboť kapky mizely během jednotek sekund, podobně jako řezy či plazmatem upravené vzorky z předchozích sad. Tento jev je patrně důsledkem silnějšího pěnícího efektu, který má hliník na draselný Baucis a díky kterému je tento druh geopolymeru mnohem poréznější (viz obr. 31). Vypěněné vzorky vyrobené z draselného Baucisu jsou tedy silně nasákavé samy o sobě.

Tabulka 34 *- Neupravený povrch vypěněných vzorků ze sady 5*

t(s)	úhel (°)	
0	23,8	29,1
1	13,3	9
2	-	-

8.2.10.2 Povrch upravený plazmatem a řez

Stejně jako u neupraveného povrchu je i řez a plazmatem upravený povrch silně nasákavý. Především řez, který je navíc velmi silně porézní. Kapku se nepodařilo zachytit v žádném případě.

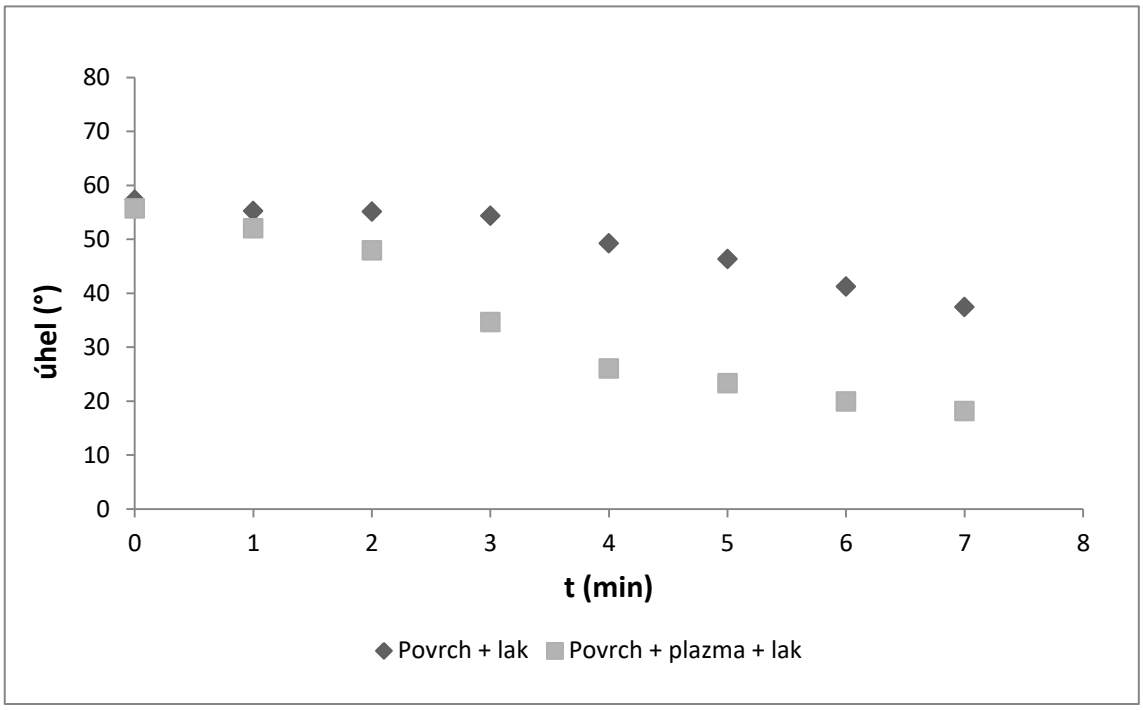
8.2.10.3 Vzorky upravené lakem

Vzorky upravené lakem měly, alespoň ze začátku, podobné vlastnosti, byť byl počáteční povrchový úhel nižší než u většiny ostatních vzorků, a povrchový úhel klesal mnohem pomaleji než bez úpravy (kdy se kapka okamžitě vsákla). U vzorků, které byly upravené plazmatem, však došlo k výraznějšímu snížení povrchového úhlu, než u samotného lakem upraveného laku i u předchozích vzorků, je tedy možné, že při použití draselného Baucisu je u vypěněných vzorků komplikovanější vytvořit na jejich povrchu souvislou vrstvu laku, přičemž úprava plazmatem může podpořit jeho částečné vsáknutí dovnitř. Na úpravu takto silně vypěněných vzorků je tedy vhodné používat laku více a aplikaci několikrát zopakovat.

Na řezu, jak samotném, tak upraveném plazmatem, se nepodařilo vytvořit souvislou vrstvu laku, díky jejich velmi vysoké poréznosti.

***Tabulka 35** - Vypěněné vzorky ze sady 5 upravené lakem*

t(min)	povrch+lak	povrch+plazma+lak
0	57,3	55,7
1	55,2	52
2	55,1	47,9
3	54,3	34,6
4	49,2	26
5	46,3	23,3
6	41,2	19,9
7	37,4	18,1



***Graf 19** - Vypěněné vzorky ze sady 5 upravené lakem, závislost kontaktního úhlu na čase*

8.3 Porovnání sad

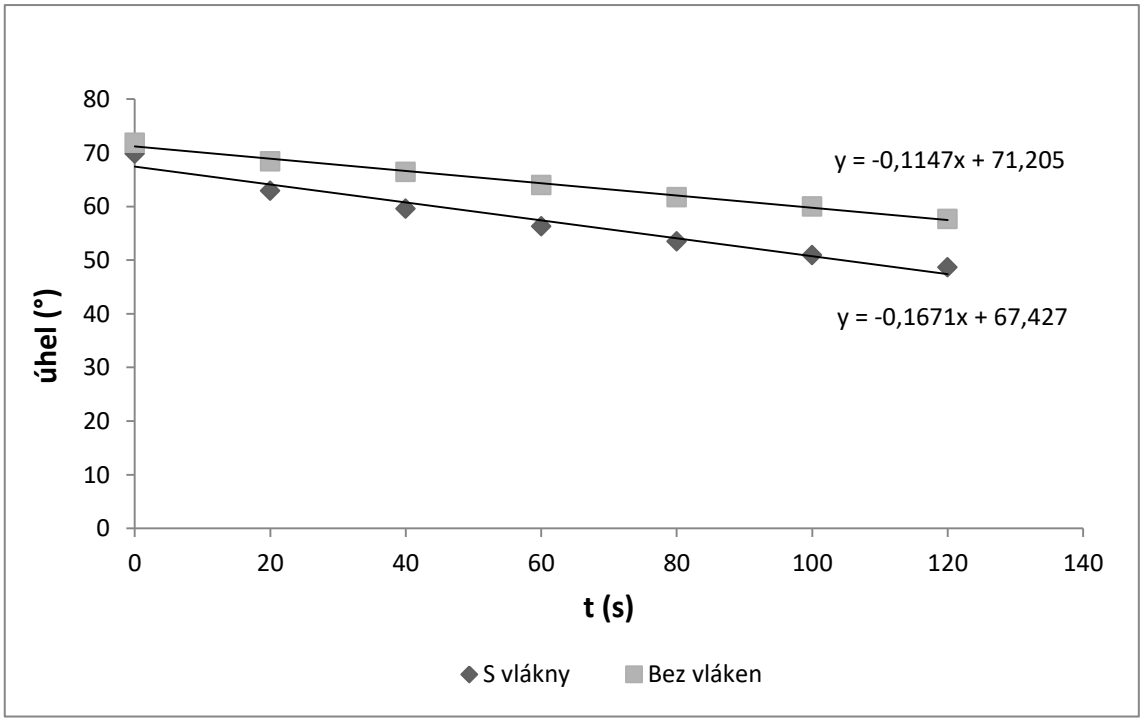
8.3.1 Vliv čedičových vláken (Sady 1 a 2)

Byla porovnána sada 1, do které byla kromě Baucisu, písku a siliky přidána ještě čedičová vlákna, se sadou 2, do které vlákna přidána nebyla.

8.3.1.1 Kompaktní

Počáteční kontaktní úhel na neupraveném povrchu kompaktních vzorků byl u obou sad podobný (69,86° u vzorků s vlákny a 71,9° u vzorků bez vláken, nicméně, jak ukazuje graf 20, u vzorků s vlákny úhel klesal rychleji a kontaktní úhel po dvou minutách vsakování vody se tady výrazně lišil (48,68° u vzorků s vlákny a 57,68° u vzorků bez vláken). Vlákna tedy u těchto vzorků zvýšila jejich nasákavost pro vodu. Směrodatná odchylka byla vyšší u vzorků s vlákny,

která tak mají i vliv na formování povrchu, který činí nesourodějším, což je patrně důvod, proč jsou vzorky s vlákny nasákavější.



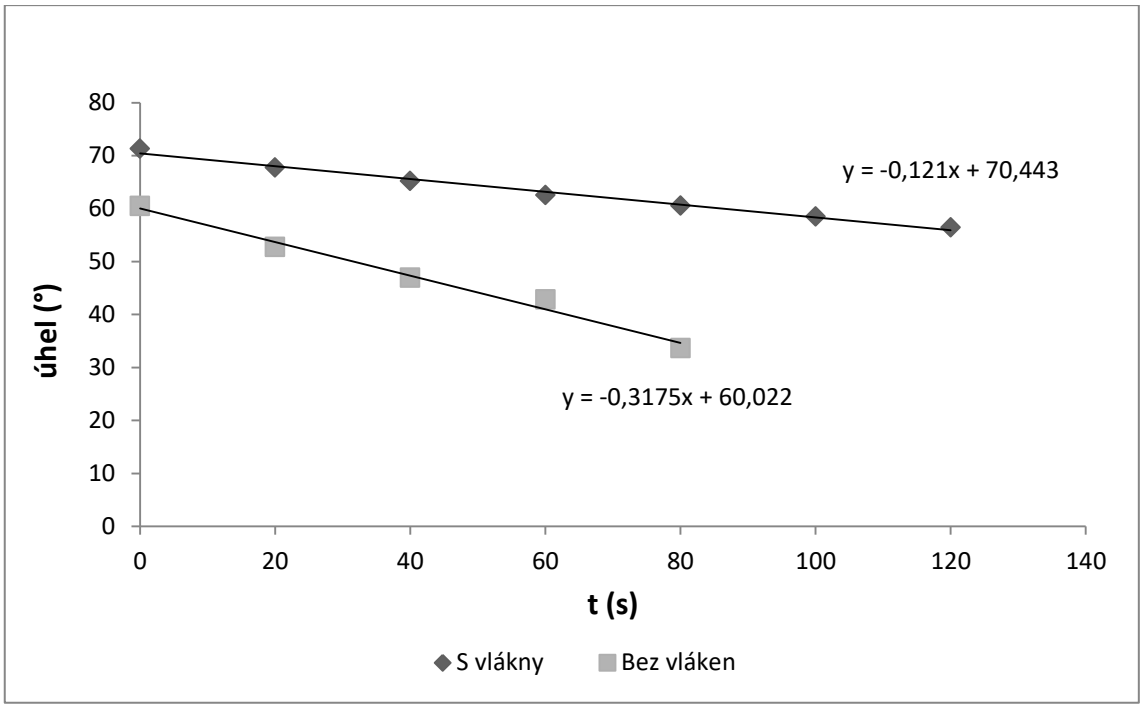
***Graf 20** – Kompaktní vzorky s vlákny a bez vláken, průměrné hodnoty počátečního kontaktního úhlu u neupraveného povrchu*

Vzorky s vlákny však byly méně nasákavé na řezu a plazmatem upraveném povrchu, kapku se u nich podařilo zachytit maximálně jednou, na plazmatem upraveném řezu dokonce ani jednou, zatímco u vzorků s vlákny byla kapka měřitelná několik sekund, s vyjímkou plazmatem upraveného řezu, kde byla zachycena pouze jednou.

U vzorků upravených lakem měly vzorky s vlákny povrchový úhel v průměru nižší než vzorky bez vláken, což opět naznačuje, že jejich povrch byl nesourodější, což ztěžovalo zformování souvislé vrstvičky laku.

8.3.1.2 Vypěněné

Počáteční kontaktní úhel se u vypěněných vzorků z první a druhé sady výrazně lišil (71,32° v vzorků s vlákny a 60,46° u vzorků bez vláken) a u vzorků bez vláken klesal výrazně rychleji. U vypěněných geopolymerů tedy vlákna nasákavost snižují, pravděpodobně vlivem na proces vypěňování, vzhledem k tomu, jak rozdílný je průběh vsakování u kompaktních a vypěněných vzorků bez vláken. U vzorků s vlákny je průběh i počáteční úhel velmi podobný.



Graf 21 – *Vypěněné vzorky s vlákny a bez vláken, průměrné hodnoty počátečního kontaktního úhlu u neupraveného povrchu*

Při měření vlastností vypěněných vzorků s vlákny, resp. bez vláken na řezu a plazmatem upraveném povrchu byly zjištěny prakticky shodné vlastnosti. Na řezu, ať už upraveným plazmatem či ne, se kapku nepodařilo zachytit u obou sad ani jednou, zatímco na plazmatem upraveném povrchu se ji podařilo zachytit pouze jednou.

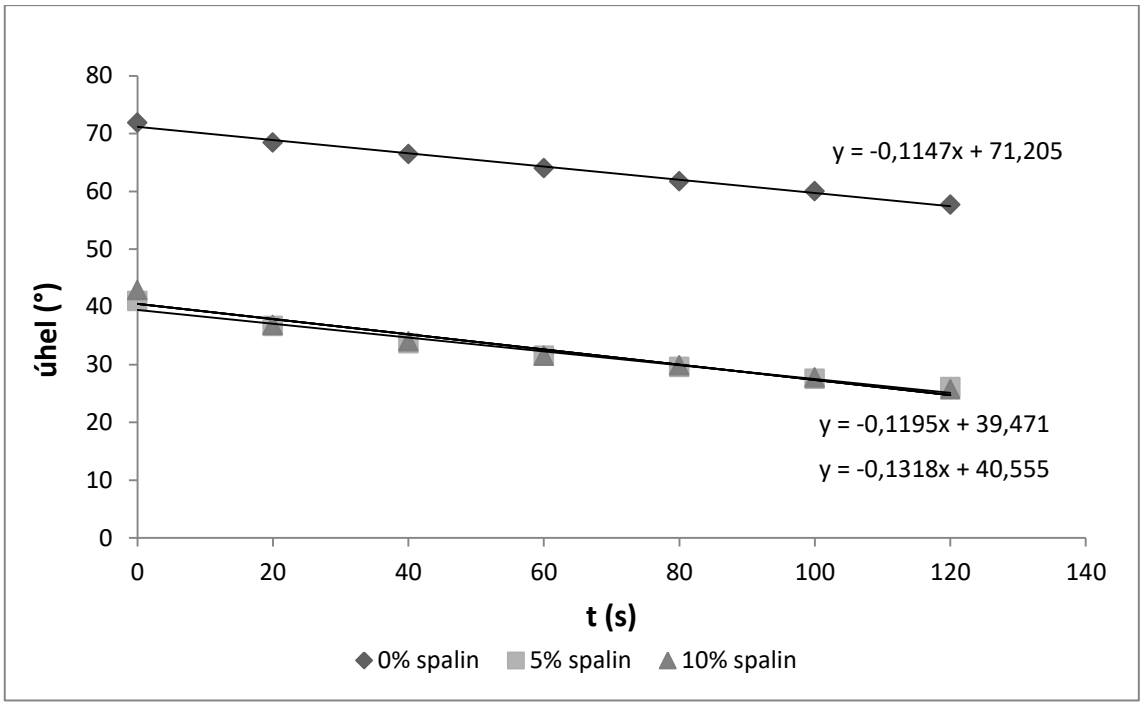
U vzorků upravených lakem nebyly zjištěny žádné výrazné rozdíly.

8.3.2 Vliv spalin (Sady 2, 3 a 4)

Byly porovnány sady 2, 3 a 4, které měly stejné složení s vyjímkou příměsi spalin z elektrostatického odlučovače tepelné elektrárny.

8.3.2.1 Kompaktní

Počáteční kontaktní úhel na neupraveném povrchu kompaktních vzorků bez popela byl výrazně vyšší, než na neupraveném povrchu vzorků s obsahem spalin (71,9° u vzorku bez příměsi spalin a 40,99°, resp. 42,87° u vzorků se spalinami). Pokles povrchového úhlu byl mírně rychlejší u sad s popelem (dle srovnání koeficientů lineární spojnice trendu, z grafu 21 není přílišný rozdíl vidět). Popel tedy zvýšil hydrofilitu povrchu a zároveň jeho nasákavost. Rozdíl mezi měřenými povrchovými vlastnostmi u vzorků s 5% a 10% spalin byl minimální.



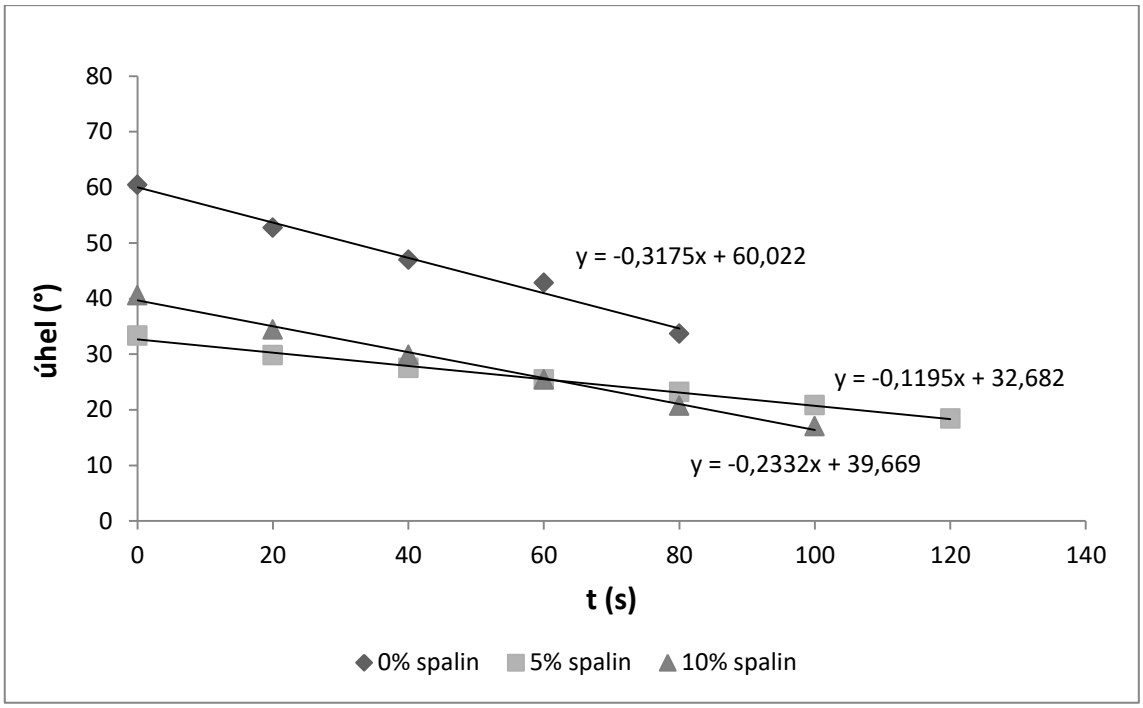
***Graf 22** – Kompaktní vzorky s 0%, 5% a 10% spalin, průměrné hodnoty počátečního kontaktního úhlu u neupraveného povrchu*

Na neupraveném řezu byly vzorky s popelem méně nasákavé, jak u 5%, tak u 10% byla kapka měřitelná několik sekund, zatímco u vzorku bez popela byla zachycena pouze jednou. Na plazmatem upraveném povrchu a řezu měly všechny sady podobné vlastnosti.

U vzorků upravených lakem měly všechny sady podobné vlastnosti.

8.3.2.2 Vypěněné

Počáteční kontaktní úhel byl u vypěněného vzorku bez příměsi spalin výrazně vyšší (60,46°), než u vzorků se spalinami, které však na rozdíl od kompaktních vzorků se stejných sad vykazovaly výrazný rozdíl jak v počátečním kontaktním úhlu, tak v průběhu vsakování. Vypěněné vzorky s 10% spalin sice vykazovaly mírně vyšší počáteční kontaktní úhel (40,55° proti 33,33° u vzorků s 5% spalin), ale kapka se u nich vsakovala pomaleji. Spaliny mají patrně vliv na proces, neboť se tento jev neobjevil u kompaktních vzorků ze stejných sad.



***Graf 23** – Vypěněné vzorky s 0%, 5% a 10% spalin, průměrné hodnoty počátečního kontaktního úhlu u neupraveného povrchu*

Stejně jako u kompaktních vzorků bylo na neupraveném řezu jednodušší zachytit kapku u vzorků s příměsí spalin, u vzorků bez příměsi se ji dokonce nepodařilo zachytit ani jednou. Plazmatem upravený povrch a řez měli podobné vlastnosti.

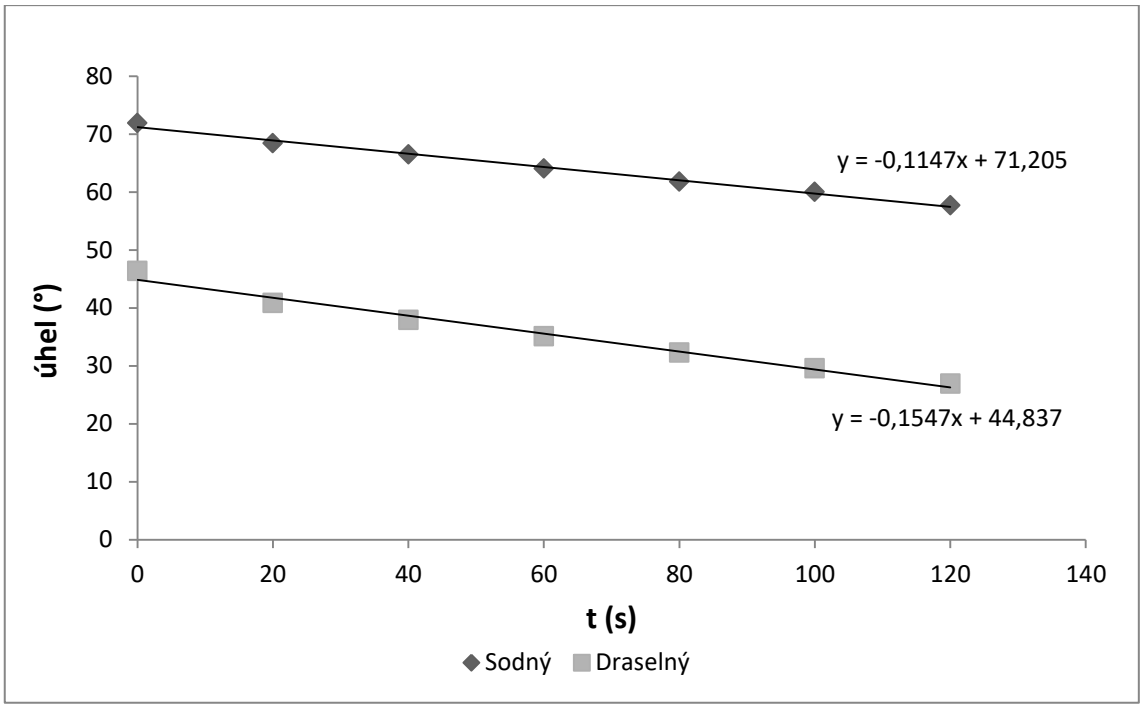
U vzorků upravených lakem měly všechny sady podobné vlastnosti.

8.3.3 Vliv Baucisu (Sady 2 a 5)

Byly porovnány sady 2 a 5, které měly stejné složení bez speciálních přísad, nicméně sada 2 byla připravena ze sodného geopolymerního základu (Baucisu) a sada 5 byla připravena z draselného základu.

8.3.3.1 Kompaktní

Počáteční kontaktní úhel na neupraveném povrchu kompaktních vzorků připravených ze sodného Baucisu byl výrazně vyšší, než u vzorků z draselného Baucisu. Pokles povrchového úhlu u draselných vzorků byl navíc mírně rychlejší, než u sodných vzorků, jak je vidět jak z grafu 23, tak z porovnání koeficientů lineární spojnice trendu. Draselný Baucis tedy patrně má vliv na formování povrchu geopolymeru, který činí nesourodějším a tedy nasákavějším.



***Graf 24** – Kompaktní vzorky ze sodného a draselného Baucisu, průměrné hodnoty počátečního kontaktního úhlu u neupraveného povrchu*

Na řezu a plazmatem upraveném povrchu byla však zjištěna vyšší nasákavost u sodných vzorků, u kterých se na neupraveném řezu a plazmatem upraveném povrchu podařilo kapku zachytit jen jednou, na plazmatem upraveném řezu dokonce ani jednou, zatímco u draselných vzorků se ji podařilo vždy zachytit minimálně dvakrát (v intervalu jedné sekundy).

U vzorků upravených lakem měly obě sady podobné vlastnosti.

8.3.3.2 Vypěněné

Neupravený povrch vypěněných sodných vzorků byl sice výrazněji nasákavější než většina ostatních vzorků, ale povrch vypěněných draselných vzorků byl svou nasákavostí blíže spíše řezu. Kapkám na něm vždy trvalo jen několik sekund, než se vsákly. Tento jev je pravděpodobně způsoben výrazně silnějším vypěněním těchto vzorků (viz obr. 31), což vedlo ke zformování zcela nesourodého povrchu neschopného na sobě kapku udržet.

U vzorků upravených lakem je možné porovnávat pouze povrch (upravený i neupravený plazmatem), neboť na řezu nebylo díky hlubokým dírám vůbec možné vytvořit souvislou vrstvičku laku, nicméně vzorky měly podobné vlastnosti, byť byl povrchový úhel u draselných vzorků mírně nižší než u sodných vzorků.

8.3.4 Počáteční rychlejší vsakování

U všech měření na neupraveném povrchu byla první hodnota vyšší, než by měla dle použité lineární spojnice trendu být (měření bylo spouštěno po stabilizaci kapky), u většiny vzorků též zkušební odstranění této první hodnoty zvýšilo hodnotu spolehlivosti, obvykle na hodnoty velmi blízké 1. Z toho se dá usoudit, že průběh vsakování byl zpočátku rychlejší (pravděpodobně s exponenciálním průběhem) a za několik sekund přecházel do lineárního průběhu. Povrchová vrstva geopolymerních vzorků tedy patrně měla odlišné vlastnosti a vyšší nasákavost, než vnitřní struktura, a její nasycení tedy vedlo ke zpomalení vsakování kapky.

9 Závěr

V této diplomové práci byly nejdříve připraveny geopolymerní vzorky. Část s využitím běžně používaných příměsí. Bylo však zjištěno, že geopolymer se zformuje i při použití uhelných spalin jako plnidla (s 5, resp. 10 hm. %) a geopolymery jsou touto příměsí obarveny do tmavších odstínů šedé, případně až do černa.

Při zkoumání povrchových vlastností geopolymerů bylo potvrzeno, že geopolymery nejsou samy o sobě voděodolné, byť některé vykazovaly zdánlivou hydrofobitu, při které byl sice zjištěn vysoký počáteční kontaktní úhel, ale kapka se přesto vsakovala. Vypěněné vzorky vykazovaly vyšší nasákavost u všech sad s vyjímkou sady s čedičovými vlákny, která patrně mají vliv na proces vypěňování.

Povrchová úprava plazmatem výrazně zvýšila nasákavost všech vzorků, kapka vody se aplikaci plazmatu vsakovala v řádu několika sekund, oproti několika minutám na neupraveném povrchu. Aplikace laku Revacryl však vsakování vody zabránila, nicméně plazmatická úprava patrně neměla vliv na vlastnosti takto upravených vzorků.

Při porovnávání výsledků měření jednotlivých sad bylo zjištěno, že příměs čedičových vláken mírně zvýšila nasákavost kompaktních vzorků, zatímco nasákavost kompaktních vzorků snížila, což opět naznačuje vliv čedičových vláken na proces vypěňování. Příměs spalin výrazně snížila počáteční kontaktní úhel, přičemž na rychlost vsakování měla u kompaktních vzorků jen minimální vliv, zatímco u vypěněných vzorků byl pokles povrchového úhlu u obou sad s příměsí spalin pomalejší, než u sady bez příměsi. Vzorky připravené z draselného Baucisu vykazovaly nižší počáteční kontaktní úhel, než vzorky připravené ze sodného Baucisu. Tento rozdíl je obzvláště výrazný u vypěněných vzorků, neboť vzorky z Draselného Baucisu byly vypěněny mnohem výrazněji.

Předmětem dalšího studia možností využití příměsí spalin jako barviva a výplně do geopolymerů by mělo být především testování mechanických vlastností takto připravených geopolymerů, pro zjištění, zda tyto vlastnosti výrazně nezhoršují. Dále by bylo vhodné otestovat další odpadní komodity (například jiné druhy spalin) a možnosti jejich využití jako výplně či barviva pro geopolymery. Plazmatická úprava se ukázala být účinná pro zvýšení smáčivosti povrchu i řezu všech geopolymerních vzorků, dalším krokem by tedy mělo být studium možností funkcionalizace povrchu geopolymerů, například při provádění hydrofobních či antibakteriálních povrchových úprav, barvení apod. a využití plazmatické povrchové aktivace pro zvýšení jejich efektivity.

Zdroje

[1] Flow Measurement & Vacuum Control in Plasma Treating Systems, *DigiVac* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: https://blog.digivac.com/flow-measurement-vacuum-control-in-plasma-treating-systems

[2] Denes, F.S. and S. Manolache, Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. Progress in Polymer Science, 2004. 29(8): p. 815-885.

[3] Quasi-neutrality, *Plasma-Universe.com* [online]. 2019 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: https://www.plasma-universe.com/Quasi-neutrality

[4] Coulombův zákon, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*[online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Coulomb%C5%AFv_z%C3%A1kon

[5] HOROVÁ, Zuzana, 2007. Plazma. *FyzWeb: Hvizdy* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/5_plazma.pdf

[6] SELLA, Andrea, Crookes' tube. *Chemistry World* [online]. 19.3.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.chemistryworld.com/opinion/crookes-tube/8381.article

[7] Sprengel pump, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sprengel_pump

[8] NOVÁK, Vladimír, 1900. O skupenství hmoty. *Časopis pro pěstování mathematiky a fysiky*. **29**(4), 273--281.

[9] The Discovery of the Electron, *Chemistry Libretexts* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_A_Molecular_Approach_(Tro)/02%3A_Atoms_and_Elements/2.4%3A_The_Discovery_of_the_Electron

[11] J. J. Thomson, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson

[12] William Crookes, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Crookes

[13] William Crookes,On radiant matter, Journal of the Franklin Institute, Volume 108, Issue 5, 1879, Pages 305-316, ISSN 0016-0032, https://doi.org/10.1016/0016-0032(79)90319-3. (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003279903193)

[14] Πλάσμα , ατος, τό, *Perseus digital library* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.04.0057%3Aentry%3Dpla%2Fsma

[15] Irving langmuir, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Irving_Langmuir

[16] MOTT-SMITH, Harold M., 1971. "History of "plasmas"". *Nature*. **223**, 219. DOI: https://doi.org/10.1038/233219a0.

[17] GOLDSTON, Robert J. a Paul H. RUTHERFORD, c1995. 1.1 What is a plasma. *Introduction to plasma physics*. Philadelphia: Institute of Physics Pub., s. 1. ISBN 978-0750301831.

[18] PUERTA, Julio a Pablo MARTÍN, 1999. *Plasma Physics: Proceedings of the 1997 Latin American Workshop : VII LAWPP 97*. 1. Springer Science & Business Media. ISBN 079235527X.

[19] STELLAR RADIATION & STELLAR TYPES: HYDROSTATIC EQUILIBRIUM, *European Space Agency: Educational support* [online]. 14.3.2013 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: http://sci.esa.int/education/35774-stellar-radiation-stellar-types/?fbodylongid=1693

[20] ŠVANDA, Michal, Co je to meziplanetární médium? Je ve Sluneční soustavě vakuum?. *100+1* [online]. 16.5.2015 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.stoplusjednicka.cz/co-je-meziplanetarni-medium-je-ve-slunecni-soustave-vakuum

[21] HELMENSTINE, Anne Marie, Is Fire a Gas, Liquid, or Solid?. *ThoughtCo* [online]. 6.5.2019 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.thoughtco.com/what-state-of-matter-is-fire-604300

[22] Lightning, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning

[23] MARTINEK, František, Jak vznikají nádherné polární záře. *100+1* [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.stoplusjednicka.cz/polarni-zare-nebeske-malovani

[24] HELLER, Jan. Vliv plazmatické předúpravy na adhezní vlastnosti textilií: Influence of plasma pretreatment on adhesive properties of textiles. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. Diplomové práce.

[25] FARLEY, Donald T., 1978. The Ionospheric plasma. *Space Plasma Physics: The Study of Solar-System Plasmas*. Washington, DC: The National Academies Press., s. 364-525.

[26] MAPES, Terri, The Aurora Borealis (Northern Lights). *TripSavvy: Vacation like a pro* [online]. 25.12.2018 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.tripsavvy.com/aurora-borealis-northern-lights-guide-1626395

[27] Heavy ions and quark-gluon plasma, *CERN: Accelerating science* [online]. [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: https://home.cern/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma

[28] KRÁLOVÁ, Magda, PLAZMA. *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/plazma

[29] Sahova rovnice, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sahova_rovnice

[30] CHLÁDOVÁ, Andrea, 2009. *CHEMICKÁ ANALÝZA TEXTILIÍ PO PLAZMATICKÉ ÚPRAVĚ: CHEMICAL ANALYSIS OF TEXTILES BY MODIFICATION OF THE PLASMA*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.

[31] KULHÁNEK, Petr, 2002. Mlhovinový plazmaglosář. *Astropis*. **2002**(Speciál), 18.

[32] TLAPÁKOVÁ, Veronika, 2010. *Plazmatická předúprava kompozitních výztuží z vláken: Plasma treatment of fiber reinforced composites*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jana Šašková.

[33] LIBRA, Martin a Zdeněk KLUIBER, 2001. Plazma je všude kolem nás. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. (1).

[34] MONTH OF EQUATIONS: WHAT DOES DEBYE LENGTH IN A PLASMA REALLY MEAN?, *The Secrets of the Universe* [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://secretsofuniverse.in/month-of-equations-what-does-debye-length-in-a-plasma-really-mean/

[35] Debyeova Stínící délka, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Debyeova_st%C3%ADnic%C3%AD_d%C3%A9lka

[36] Plazmová frekvence, *Ústav fyziky atmosféry* [online]. [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/iono/frekvence.html

[37] TONKS, Lewi a Irving LANGMUIR, 1929. Oscillation in ionized gases. *Physical Review*. **33**(2), 195-211.

[38] SHPATAKOVSKAYA, G.V, 2018. Dependence on ionization degree and relativistic effects in electron binding energies in free atoms and ions. *Keldysh Institute preprints*. 184-196.

[39] What kinds of plasma processes are there?, *Plasmatreat* [online]. [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: https://www.plasmatreat.com/plasma-technology/plasma-processes.htm

[40] Atmospheric Plasma, 2016. Diener electronic GmbH + Co. KG [online]. [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/lexikon/atmospheric-pressure-plasma/

[41] ČECH, Jan, 2006. *Porovnávací studium vlivů parametrů výboje na vlastnosti plazmatu koplanárního bariérového výboje*. Brno. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Mirko Černák.

[42] PALACKÝ, Jakub, 2015. Diagnostika plazmatu s využitím sond složité geometrie. Praha. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Prof. RNDr. Hrach Rudolf, DrSc.

[43] Plazmový vesmír | Co je to plazma?, Aldebaran [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.php

[44] Revoluce ve zpracování odpadů. Žhavé plazma je promění v užitečný plyn, *Idnes.cz* [online]. 5.12.2018.

[45] DVOŘÁKOVÁ, Eva, *Vliv stárnutí na změny vlastností plazmatem upravené textílie*. Liberec. Diplomová práce. 2009. Vedoucí práce Jakub Wiener.

[46] Metelmann, H.-R., Seebauer, C., Miller, V., Fridman, A., Bauer, G., Graves, D. B., … Woedtke, T. von. (2018). Clinical experience with cold plasma in the treatment of locally advanced head and neck cancer. Clinical Plasma Medicine, 9, 6–13. doi:10.1016/j.cpme.2017.09.001

[47] Isbary, G., Morfill, G., Schmidt, H. U., Georgi, M., Ramrath, K., Heinlin, J., … Stolz, W. (2010). A first prospective randomized controlled trial to decrease bacterial load using cold

atmospheric argon plasma on chronic wounds in patients. British Journal of Dermatology, no–no. doi:10.1111/j.1365-2133.2010.09744.x

[48] PlasmaDerm®, In: *CINOGY: Plasma technology for health* [online]. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: http://www.cinogy.de/img/teaser_plasmaderm.jpg

[49] Elementární procesy v plazmatu, *Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK* [online]. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=1

[50] Ionization, *Energy education* [online]. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Ionization

[51] Photo-ionization: Physics, *ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA* [online]. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/photo-ionization

[52] *Plazmochemické reakce*, Dostupné také z: http://www.is.muni.cz/th/77987/prif_m/plasmochemie.doc

[53] Electron Affinity, *Chemistry Libretexts* [online]. 2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Electron_Affinity

[54] GRAY, Richard, Have scientists invented real-life adamantium? New metal alloy has highest melting point of any known substance at 4,126°C. *Mail online* [online]. [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3178616/Have-scientists-invented-real-life-adamantium-New-alloy-highest-melting-point-known-substance-4-126-C.html

[55] Nuclear Fusion Power, *World Nuclear Association* [online]. Únor 2019 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx

[56] VYCUDILÍK, Marcel, 2011. *Tokamak ITER - rozbor systému magnetického udržení plazmatu*. Ostrava. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Martin Marek.

[57] Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů, In: *Tzbinfo* [online]. 8.8.2016 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru

[58] RICHTER, Lukáš, 2013. *Jaderná fúze – bezpečnost a environmentální dopad*. Plzeň. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Jana Jiříčková.

[59] CONRADS, H. a M. SCHMIDT, 2000. Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Science and Technology. United Kingdom, 9(4), 441-454.

[60] GAUDREAU, Marcel P. J. a Donald K. SMITH, *MICROWAVE PLASMA GENERATOR*. USA. 4,866,346. Uděleno 22.6.1987. Zapsáno 12.9.1989.

[61] Obr. 2: Fotografie doutnavého výboje s viditelnými typickými vrstvami [6]., In: *Aldebaran* [online]. [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42/2.jpg

[62] KRÁLOVÁ, Magda, DRUHY VÝBOJŮ. *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/elektricky-proud-v-plynech/druhy-vyboju

[63] READ, Giles, Wartenburg Pinwheel corona. In: *Flickr*[online]. [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/ultrapurple/5190284085/

[64] Korónový výboj, *Glosář Aldebaran* [online]. [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=718

[65] SŤAHEL, Pavel, 2012. *Dielektrické bariérové výboje a jejich aplikace*. Brno. Habilitační práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.

[66] BUDÍK, Martin, 2011. *CHARAKTERIZACE DIELEKTRICKÝCH BARIÉROVÝCH VÝBOJŮ ZA ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU*. Brno. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Milada Bartlová.

[67] 9.4 Vlastnosti povrchové vrstvy kapaliny, In: *Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK* [online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/soubory/molekul192-228-4.jpg

[68] FIKEROVÁ, Lenka, 2007. *VÝVOJ METOD PRO MĚŘENÍ KONTAKTNÍCH ÚHLŮ MEZI VLÁKNEM A KAPALINOU*. Liberec. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Josef Dembický.

[69] Povrchové napětí a kapilarita, *Fakulta pedagogická: Oddělení fyziky* [online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: https://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/mechanics/v/v2.htm

[70] KAPILÁRNÍ JEVY, *Techmania Science Center: Eduportál*[online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/struktura-latek/povrch-kapaliny/kapilarni-jevy

[71] FANDEY, Liyana, Liquids, Man, How Do They Work?. *IGL Coatings Blog* [online]. [cit. 2019-06-17]. Dostupné z: https://blog.iglcoatings.com/how-liquid-works-with-hydrophobic-hydrophilic-surfaces/

[72] MUŽÍČKOVÁ, Kamila, 2007. *HYDROFILITA A POVRCHOVÁ ENERGIE TENKÝCH VRSTEV*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Aleš Kolouch.

[73] Yaghoubi, H. and N. Taghavinia, Surface chemistry of atmospheric plasma modified polycarbonate substrates. Applied Surface Science, 2011. 257(23): p. 9836-9839

[74] LUKÁŠOVÁ, Věra, 2012. Modifikace nanovlákenných nosičů plazmou a její vliv na adhezi, viabilitu a proliferaci mezenchymálních kmenových buněk. Praha. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Evžen Amler.

[75] Tendero, C., et al., Atmospheric pressure plasmas: A review. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2006. 61(1): p. 2- 30.

[76] Kowalonek, J., H. Kaczmarek, and A. Dąbrowska, Air plasma or UVirradiation applied to surface modification of pectin/poly(vinyl alcohol) blends. Applied Surface Science, 2010. 257(1): p. 325-331

[77] RŮŽEK, Vojtěch, 2018. *Studium kinetiky funkcionalizace povrchu nanovláken po aktivaci plazmatem*. Liberec. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Hana Tománková

[78] PLASMA APPLICATIONS, *Thierry: Plasma science and technology* [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://www.thierry-corp.com/plasma-applications/

[79] MANUEL LÓPEZ LÓPEZ, José, Alhaji M. KAMARA a Sundar MARIMUTHU, 2017. Chapter 5 - Droplet-Assisted Laser Cleaning of Contaminated Surfaces. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Types of Contamination and Contamination Resources*. **9**, 151-169.

[80] SHUN'KO, E. V. a V. S. BELKIN, 2007. Cleaning properties of atomic oxygen excited to metastable state. *Journal of Applied Physics*. **102**.

[81] The effect of plasma treatment② -Surface Cleaning-, In: *Sakigake* [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://sakigakes.co.jp/eng/gazou15.png

[82] Seino, T., Matsuura, T. and Murota, J. (2002), Atomic-order nitridation of SiO2 by nitrogen plasma. Surf. Interface Anal., 34: 451–455. doi:10.1002/sia.1336

[83] PLASMA CLEANING, *Thierry: Plasma science and technology* [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://www.thierry-corp.com/plasma-cleaning/

[84] *Plasma Technology*, 2007. 1. Germany: Diener electronic GmbH + Co.

[85] SLAYBAUGH, RaeAnn, 2000. Sterilization: Gas Plasma, Steam, and Washer-Decontamination. *Infection Control today* [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://www.infectioncontroltoday.com/environmental-hygiene/sterilization-gas-plasma-steam-and-washer-decontamination

[86] *Zařízení pro aktivaci povrchů plazmou*, Dostupné také z: http://www.metess.cz/prospektplazma.pdf

[87] TESAŘ, Jakub, 2008. *Plazmochemická aktivace povrchu skla v povrchovém výboji ve vzduchu za atmosférického tlaku*. Brno. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce A. Brablec.

[88] PLASMA ETCHING, IMPROVING BOND STRENGTHS PAINT ADHESION, In: *Plasma Technology* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: https://www.plasma-treating.com/about_plasma/plasma-etching.html

[89] Valence, S. de, Tille, J.-C., Chaabane, C., Gurny, R., Bochaton-Piallat, M.-L., Walpoth, B. H., & Möller, M. (2013). Plasma treatment for improving cell biocompatibility of a biodegradable polymer scaffold for vascular graft applications. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 85(1), 78–86.

[90] WANG, J.H, 2012. 5.6.1 Plasma etching. *Coatings for Biomedical Applications*. s. 156-157.

[91] Plasma etching, *Diener electronic: Plasma surface technology* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: https://www.plasma.com/en/applications/plasma-etching/

[92] FUKOVÁ, Šárka, 2017. *Plazmová polymerace tenkých vrstev s epoxidovými skupinami*. Brno. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Lenka Zajíčková.

[93] Plasma Coating, *Thierry: Plasma science and technology* [online]. [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: https://www.thierry-corp.com/pecvd-plasma-coating

[94] Abdelrahim, R. A., Badr, N. A., & Baroudi, K. (2016). The effect of plasma surface treatment on the bioactivity of titanium implant materials (in vitro). *Journal of International Society of Preventive & Community Dentistry*, *6*(1), 15-21.

[95] HOLČÁK, Michal, 2017. *Měření vlastností povlaků vytvořených PVD technologií*. Zlín. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce David Maňas.

[96] ROŻEK, Zbigniew a David POSPÍŠIL, 2018. *Plazmové modifikace povrchu*. Liberec.

[97] VOLFOVÁ, Lenka, 2016. *VLIV DIFÚZE NA PECVD FUNKČNÍCH VRSTEV*. Liberec. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Petr Špatenka.

[98] Chemická depozice z plynné fáze, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-06-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chemick%C3%A1_depozice_z_plynn%C3%A9_f%C3%A1ze

[99] SOBOTKOVÁ, Jana, 2009. *STUDIUM ADHEZE NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV K NOSNÝM MATERIÁLŮM*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jiří Chaloupek.

[100] Význam adheze a koheze pro vodní organismy, *Technická univerzita Ostrava: Hornicko Geologická fakulta* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/ahdeze.htm

[101] Modifying the surface tension, *Diener electronic: Plasma science and technology* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/lexikon/modifying-the-surface-tension/

[102] *Diener electronic: Plasma surface technology*[online], [cit. 2019-07-08]. Dostupné z: https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/

[103] LÁNÍK, Pavel, 2014. Geopolymerní kompozitní systémy a jejich odolnost k mechanickému namáhání. Liberec. Diplomová. TUL.

[104] HIEP, Le Chi, 2015. Studium žárové odolnosti protipožárních zábran pomocí kompozitů na bázi geopolymerů. Liberec. Diplomová. TUL.

[105] DUFKOVÁ, Iva, 2011. *Speciální kompozitní materiály pro stavebnictví*. Liberec. Diplomová. TUL.

[106] Geopolymers are changing the world, In: *University of Oulu* [online]. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://www.oulu.fi/sites/default/files/186/DSC_0027_www.jpg

[107] History, *Geopolymer* [online]. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: http://geopolymer.weebly.com/history.html

[108] Piezobrush® PZ2, *Relyon Plasma* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: https://www.relyon-plasma.com/relyon-plasma-products/piezobrush-pz2/?lang=en