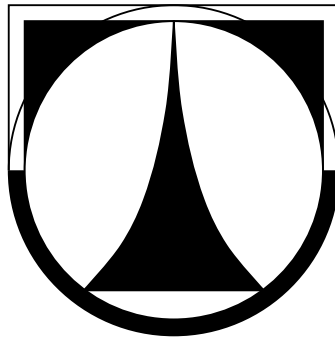


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Katedra materiálů

---



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Liberec 2007

Milan Šimko

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Katedra materiálu

---

**Studijní program: M2301 — Strojní inženýrství**

**Studijní obor: 2303T002 — Strojírenská technologie**

**Zaměření: Materiálové inženýrství**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Přírodní rostlinná vlákna jako vyztužující prvky polymerních matric kompozitních systémů**

**The natural fibers as reinforcing elements of the polymeric matrices of composite systems**

**KMT-228**

**MILAN ŠIMKO**

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Dora Kroisová, Ph. D.

**Konzultant:** Ing. Taťana Vacková

Rozsah práce: 34 stran

obrázků	tabulek	literatury	příloh
17	6	33	4

**Liberec**

**2007**

Zde vložit zadání...

# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít svou diplomovou práci či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené na straně 35 a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 22. května 2007

.....

Milan Šimko

# Poděkování

Mé poděkování patří všem, kteří mi byli oporou po celou dobu studia, a kteří se přímo či nepřímo zasloužili o to, že tato práce mohla vzniknout.

Touto cestou bych také rád poděkoval profesoru Donaldu E. Knuthovi za to, že dal zdarma celému světu systém pro precizní sazbu  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ tu a Lesliemu Lamportovi, že tento systém implementoval do svého  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ u, jenž mi byl mocným nástrojem pro sazbu této diplomové práce.

# Anotace

Předmětem diplomové práce je seznámení s přírodními rostlinnými vlákny a jejich využitím jako vyztužujících prvků vícesměrných kompozitních systémů s polymerní matricí. Za přírodní vlákna byl vybrán bambus a technické konopí. Polymer použitý jako matrice kompozitního systému byl polypropylen.

Pro zlepšení kvality vytvářeného mezifázového rozhraní mezi vyztužujícími vlákny a matricí, vzniklého v důsledku spojování hydrofilního a hydrofobního materiálu, bylo použito studené plazma, kterým byl modifikován povrch práškového polymeru. Za účelem dosažení různé povrchové modifikace byly jako pracovní plyny použity kyslík a vzduch.

## Klíčová slova

bambus; kompozit; přírodní vlákna; polymerní matrice; polypropylen; povrchové úpravy; studené plazma; technické konopí;

# Annotation

The aim of diploma thesis is an introduction of the natural fibers and their using as reinforcing elements of the multi-axials composite systems with the polymeric matrix. Bamboo and industrial hemp have been selected as natural fibers. Polypropylene has been used as the matrix material of composite system.

Cold plasma, by which has been modified surface of powder polymer, has been used for improvement of quality an interphase boundary between the reinforcing fibers and the matrix, that have been made as a result of coupling the hydrophile and the hydrophobic material. Oxygen and air have been used as working gases for purpose to enhance various surface treatment.

## Keywords

bamboo; composite; natural fibers; polymeric matrices; polypropylene; surface treatment; cold plasma; industrial hemp;

# Obsah

Prohlášení	iii
Poděkování	iv
Anotace	v
Úvod	1
<b>Kapitola 1. Teoretická část</b>	<b>3</b>
1.1 Přírodní vlákna . . . . .	3
1.1.1 Vlákna rostlinného původu . . . . .	4
1.1.2 Vlákna živočišného původu . . . . .	4
1.1.3 Vlákna minerálního původu . . . . .	4
1.2 Polymerní matrice . . . . .	5
1.3 Kompozitní systémy . . . . .	6
1.3.1 Rozdělení kompozitních systémů . . . . .	6
1.3.2 Vlákňové kompozitní systémy . . . . .	7
1.4 Mezifázové rozhraní a možnosti jeho ovlivnění . . . . .	7
1.4.1 Fyzikální metody — studené plazma . . . . .	8
1.4.2 Chemické metody — vazná činidla . . . . .	9
1.5 Testovací metody . . . . .	10
1.5.1 Tahová zkouška . . . . .	10
1.5.2 Rastrovací elektronová mikroskopie . . . . .	13
1.6 Použitá výztuž a matrice . . . . .	15
1.6.1 Bambus . . . . .	15
1.6.2 Konopí seté . . . . .	16
1.6.3 Polypropylen . . . . .	17



<b>Kapitola 2. Experimentální část</b>	<b>19</b>
2.1 Modifikace povrchu práškového polymeru . . . . .	19
2.2 Příprava zkušebních těles . . . . .	20
2.2.1 Sušení přírodních vláken . . . . .	20
2.2.2 Lisování desek pro přípravu zkušebních těles . . . . .	20
2.3 Stanovení tahových vlastností . . . . .	21
2.4 SEM analýza lomových ploch . . . . .	28
<b>Kapitola 3. Diskuse výsledků</b>	<b>31</b>
<b>Kapitola 4. Závěr</b>	<b>34</b>
<b>Literatura</b>	<b>35</b>
<b>Přílohy</b>	
<b>Příloha A. Homogenizace výztuže s maticí</b>	
<b>Příloha B. Tahové křivky</b>	
<b>Příloha C. Gaussovy křivky</b>	
<b>Příloha D. Materiálový list PP BE170MO</b>	

# Seznam obrázků

1.1	Schéma rozdělení přírodních vláken . . . . .	3
1.2	Schéma rozdělení polymerních matric . . . . .	5
1.3	Schéma rozdělení kompozitních systémů . . . . .	7
1.4	Tvar zkušební tělesa typu 1BA . . . . .	10
1.5	Tahová křivka semikrystalického termoplastu . . . . .	12
1.6	Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu . . . . .	14
1.7	Prostorový model polypropylenu . . . . .	17
2.1	Schéma systému downstream . . . . .	19
2.2	Tahové křivky čisté matrice . . . . .	22
2.3	Srovnání mechanických parametrů čisté matrice . . . . .	23
2.4	Tahové křivky matrice vyztužené vlákny bambusu . . . . .	24
2.5	Srovnání mechanických parametrů matrice vyztužené vlákny bambusu . . . . .	25
2.6	Tahové křivky matrice vyztužené vlákny konopí . . . . .	26
2.7	Srovnání mechanických parametrů matrice vyztužené vlákny konopí . . . . .	27
2.8	SEM analýza lomových ploch čisté matrice . . . . .	28
2.9	SEM analýza lomových ploch matrice vyztužené vlákny bambusu . . . . .	29
2.10	SEM analýza lomových ploch matrice vyztužené vlákny konopí . . . . .	30

# Seznam tabulek

1.1	Mechanické parametry a chemické složení vlákna bambusu . . . . .	15
1.2	Mechanické parametry a chemické složení vlákna konopí . . . . .	16
2.1	Rozměry pracovních částí zkušebních těles typu 1BA . . . . .	21
2.2	Mechanické parametry čisté matrice . . . . .	22
2.3	Mechanické parametry matrice vyztužené vlákny bambusu . . . . .	24
2.4	Mechanické parametry matrice vyztužené vlákny konopí . . . . .	26

# Seznam zkratek

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
----------------	---------------

---

<b>MFC</b>	Mass Flow Control Unit
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PPk</b>	Polypropylen modifikovaný kyslíkovým plazmatem
<b>PPv</b>	Polypropylen modifikovaný vzduchovým plazmatem
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy

# Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$\varepsilon$	—	Poměrné prodloužení
$\varepsilon_1$	—	Poměrné prodloužení při hodnotě 0,0005
$\varepsilon_2$	—	Poměrné prodloužení při hodnotě 0,0025
$\varepsilon_e$	—	Poměrné prodloužení na mezi kluzu v tahu
$\varepsilon_m$	—	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu
$\varepsilon_t$	—	Jmenovité poměrné prodloužení
$\varepsilon_{tB}$	—	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
$\sigma_{A_t}$	%	Směrodatná odchylka celkového prodloužení při přetržení
$\sigma_{E_t}$	MPa	Směrodatná odchylka modulu pružnosti v tahu
$\sigma_{R_m}$	MPa	Směrodatná odchylka meze pevnosti v tahu
$\Delta L$	mm	Zvětšení vzdálenosti mezi čelistmi
$\Delta L_0$	mm	Zvětšení délky zkušební tělesa mezi značkami vyznačujícími počáteční měřenou délku
$\bar{b}_1$	mm	Průměrná šířka zúžené části zkušební tělesa
$\bar{h}$	mm	Průměrná tloušťka zúžené části zkušební tělesa
$A_t$	%	Celkové prodloužení při přetržení
$E_t$	MPa	Youngův modul pružnosti v tahu
$F$	N	Naměřená hodnota zatěžující síly
$F_{\max}$	N	Maximální naměřená hodnota zatěžující síly
$L$	mm	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi
$L_0$	mm	Počáteční měřená délka zkušební tělesa
$\max b_1$	mm	Maximální šířka zúžené části zkušební tělesa
$\max h$	mm	Maximální tloušťka zúžené části zkušební tělesa
$\min b_1$	mm	Minimální šířka zúžené části zkušební tělesa

$\min h$	mm	Minimální tloušťka zúžené části zkušebního tělesa
$M_k$	N · m	Kroutící moment na hřídeli šneku při homogenizaci výztuže s matricí
$n$	ot · mm <sup>-1</sup>	Otáčky šneku při homogenizaci výztuže s matricí
$R$	MPa	Smluvní napětí v tahu
$R_1$	MPa	Napětí při hodnotě poměrného prodloužení 0,0005
$R_2$	MPa	Napětí při hodnotě poměrného prodloužení 0,0025
$R_e$	MPa	Smluvní napětí na mezi kluzu v tahu
$R_m$	MPa	Smluvní napětí na mezi pevnosti v tahu
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Plocha počátečního průřezu zkušebního tělesa
$t_h$	s	Doba homogenizace výztuže s matricí
$T$	°C	Teplota při homogenizaci výztuže s matricí

# Úvod

*Ačkoliv člověk tvoří mnoho objevů pomocí různých prostředků, nikdo nezvládne nic krásnějšího, jednoduššího a přesnějšího než příroda, protože v jejích výtvorech nic nechybí a nic nepřebývá.*

— LEONARDO DA VINCI

Od doby, kdy začal člověk vytvářet umělé předměty, bylo nezbytné řešit problém nevhodnějšího materiálu. Tak lidstvo prošlo dobou kamennou, dobou bronzovou a dobou železnou. S rozvíjející se technologií však vzrůstaly materiálové požadavky, přičemž tradiční materiály nedokázaly uspokojit řadu nových potřeb. Začaly vznikat nové materiály složené z řady komponent, tzv. kompozitní systémy, mající charakter cílevědomé konstrukce.

Kompozitní systémy se staly v současné době průmyslovými materiály a na celém světě jsou předmětem rostoucího zájmu odborníků všech profesí. Řada průmyslových odvětví je dnes zcela závislá na polymerech vyztužených vlákny a tyto kompozitní materiály jsou běžně navrhovány, vyráběny a používány. Úspěch vláknových kompozitních systémů vyplývá z využití vynikající pevnosti, tuhosti a nízké měrné hmotnosti vláken. Není divu, že při své schopnosti kombinovat vynikající mechanické vlastnosti s konstrukční přizpůsobivostí a snadné výrobě, které kompozitní systémy nabízejí, daleko předstihly jiné materiály.

Zároveň musí být respektována potřeba návratnosti surovin a likvidace odpadu z těchto materiálů. Recyklace kompozitních systémů vyztužených syntetickými vlákny je vzhledem ke značným chemickým rozdílům mezi výztuží a matricí značně problematická. Proto se v posledních dvaceti letech provádí výzkum náhrady vláken syntetických vláken přírodními. Řešená problematika je v současnosti popsána již ve stovkách odborných článků, časopisech a výzkumných zprávách publikovaných

například na jednom z největších vědeckých serverů na světě ScienceDirect<sup>0.1)</sup>. Za všechny jsou uvedeny zejména [6], [9], [10], [11], [12] a [25], použité jako prameny k seznámení s řešenou problematikou.

Hlavním cílem, který si klade tato práce, jsou možnosti ovlivnění mezifázového rozhraní mezi přírodními rostlinnými vlákny a polymerní matricí krátkovláknových vícesměrných kompozitních systémů. V literatuře jsou doposud popsány způsoby ovlivnění mezifázového rozhraní cestou úpravy přírodních vláken. V této práci byla snaha zkusit opačný postup — modifikovat studeným plazmatem matrici. Pro úvodní část autor použil literaturu uvedenou v [1, 2].

Celá práce je systematicky rozčleněna do čtyř hlavních kapitol. Následující výčet stručně pojednává o jejich obsahu.

**Kapitola první** je teoretická. Zabývá se úvodem do problematiky kompozitních systémů, možnostmi ovlivnění mezifázového rozhraní a metodami použitými při testování.

**Kapitola druhá** se zaměřuje na praktické provedení experimentů, které měly za cíl zjistit vliv plazmové modifikace práškového polymeru a vlákenné výztuže na vybrané mechanické parametry.

**Kapitola třetí** je věnována souhrnu výsledků získaných na základě experimentů a diskusi možných vlivů na tyto výsledky.

**Kapitola čtvrtá** shrnuje získané poznatky celé práce a možnosti jejich uplatnění v praxi nebo dalším výzkumu.

---

<sup>0.1)</sup>Dostupný z <http://www.sciencedirect.com/>.



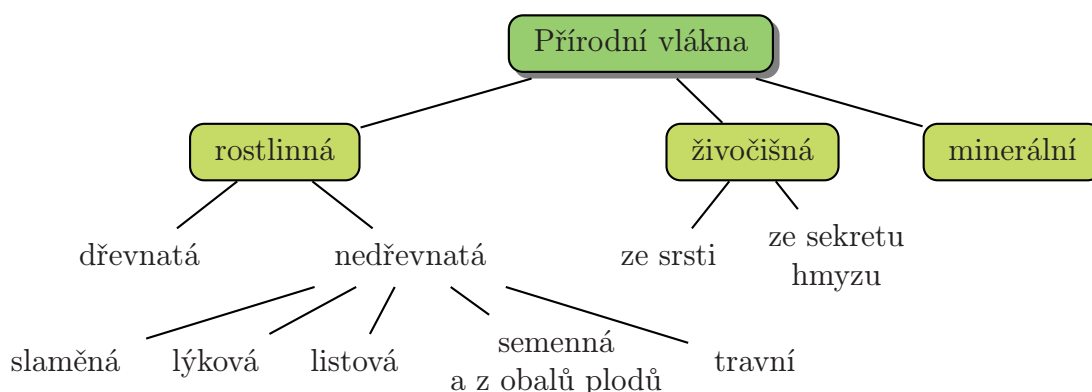
# Kapitola 1

## Teoretická část

Kompozitní systémy s vláknennou výztuží patří nesporně mezi nejstarší a nejvíce rozšířené kompozitní systémy, přesto je materiálům tohoto druhu věnováno stále více pozornosti. Výhodná je zejména kombinace polymerní matrice s vysoce tuhými a pevnými vlákny, kterých je k dispozici široké spektrum [1, 2]. Zajímavé jsou především aplikace přírodních vláken, které v porovnání s vlákny syntetickými přinášejí úspory hmotnosti výrobku. Úvod této kapitoly je věnován rozdělení přírodních vláken a přehledu polymerních matric.

### 1.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou obecně rozdělována podle svého původu na vlákna rostlinná (celulózová), živočišná (proteinová) a minerální (anorganická) [11, 23].



Obr. 1.1: Schéma rozdělení přírodních vláken [11]

### 1.1.1 Vlákna rostlinného původu

Přírodní rostlinná vlákna lze získat ze stonků (např. len, konopí, juta, ramie, kenaf), semen (např. bavlna, kapok), z listů (např. sisal, manilské konopí, konopí domingo, novozélandský len) nebo z plodů rostlin (např. kokosová vlákna) [20, 33]. Základní složkou všech rostlinných vláken je celulóza, která se nachází v buněčných stěnách ve formě makromolekulárních řetězců tvořících uspořádanou vláknitou strukturu [23].

Mezi výhody přírodních rostlinných vláken patří jejich snadná obnovitelnost, biodegradovatelnost na konci jejich životního cyklu, nenáročnost produkce ve srovnání s vlákny syntetickými a nízké abrazivní chování ve srovnání s vlákny skleněnými. Vynikají také nízkou měrnou hmotností a poměrně snadnou zpracovatelností [23].

Mezi nevýhody přírodních rostlinných vláken patří zejména značný vliv klimatických podmínek na jejich kvalitu posuzovanou mechanickými parametry. Jejich délka i tloušťka je dána podmínkami růstu vláken, které jsou ovlivněny člověkem pouze minimálně. Ze zpracovatelského hlediska může být nevýhodou i jejich hydrofilní chování [6, 20, 23].

### 1.1.2 Vlákna živočišného původu

Přírodní živočišná vlákna obsahující keratin lze získat ze srsti zvířat (např. vlna ovčí, vlna kašmírácká, vlna mohérová, králičí a zaječí chlupy, velbloudí srst nebo telecí a srnčí srst). Dále je možné živočišná vlákna získat ze sekretu hmyzu, který obsahuje fibroin (např. přírodní a lasturové hedvábí nebo pavoučí vlákna) [20].

Mezi nesporné výhody přírodních živočišných vláken patří jejich dobré elastické vlastnosti, vynikající tepelně izolační schopnost spolu s antistatickými účinky danými přirozeným obsahem tuku [20].

Jako nevýhodu přírodních živočišných vláken lze uvést jejich značnou navlhavost a nízkou chemickou odolnost, zejména vůči alkáliím [20].

### 1.1.3 Vlákna minerálního původu

Vlákna minerálního původu lze získat z anorganických krystalických minerálů (např. chrysotil, amosit, krokydolit, antofylit, tremolit nebo aktinolit) obecně označovaných jako azbesty [24].

Azbestová vlákna se vyznačují vysokou mezí pevnosti v tahu, chemickou odolností (kromě chrysotilu, který se slabě rozpouští v kyselině chlorovodíkové) a mi-

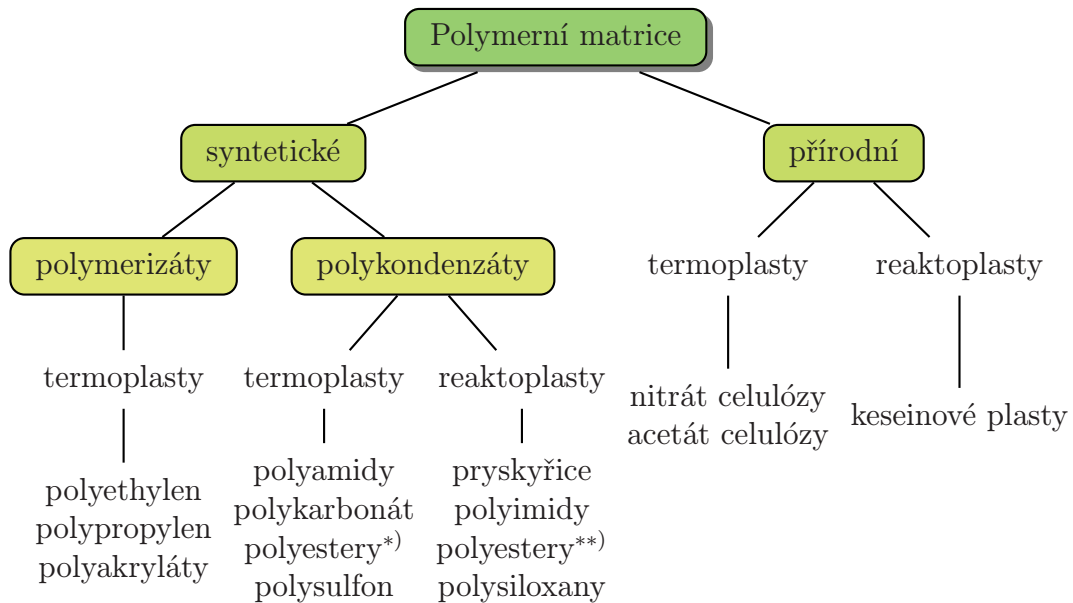
mořádnou stálostí proti působení účinků tepla a mikroorganismů. Azbest má také vysoký elektrický odpor a dobrou schopnost pohlcovat zvuk [24].

Problémem těchto vláken je jejich karcinogenní dopad na živý organismus, jelikož se z nich snadno oddělují tenká a tuhá vlákénka, která se vznášejí ve vzduchu a při vdechnutí se zabodávají do plic. Používání azbestu je nyní prakticky zakázáno [20].

## 1.2 Polymerní matrice

Materiály používané jako matrice kompozitních systémů, jejichž vyztužujícími elementy jsou přírodní rostlinná vlákna, mohou být polymery syntetické nebo přírodní, tzv. „biopolymery“<sup>1.1)</sup> [18].

Nejpoužívanější komerční polymery, vyrobené z ropných derivátů a využívané jako matrice kompozitních systémů, lze rozdělit do dvou hlavních skupin — termoplasty a reaktoplasty. Přehled technicky významných syntetických a přírodních polymerních matric podle tohoto dělení je znázorněn na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Schéma rozdělení polymerních matric [2, 18]

\*) Nasycené

\*\*) Nenasycené

<sup>1.1)</sup> Jsou vytvářeny z makromolekul, které se v průběhu růstového procesu tvoří z relativně jednoduchých látek jako jsou např.  $\alpha$ -aminokyseliny, monosacharidy, polysacharidy nebo mastné kyseliny.

Mezi hlavní výhody polymerních matric patří jejich nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, dobrá korozní a chemická odolnost (vůči kyselinám a zásadám) a dobré třecí vlastnosti [16, 17, 19].

Jako nevýhody lze zmínit nízké mechanické vlastnosti, značný creep, degradaci vlivem působení ultrafialového záření nebo nízkou teplotní stabilitu polymerů. Vzhledem k životnímu prostředí lze považovat za nevýhodu i ekologickou zatížitelnost na konci jejich životního cyklu [16, 17, 19].

Nejvýznamnější a nejpoužívanější konstrukční kompozitní systémy mají matrice z reaktoplastů, mezi které patří různé typy syntetických pryskyřic (např. nenasyčené polyesterové, epoxidové, fenolové, melaninové a siloxylové). Tyto pryskyřice umožňují rychlé vytvrzení (asi 2 min při 180 °C), mají výbornou odolnost vůči vlhkosti, neodpařují se a jsou levné. Z reaktoplastů se jako matrice používají zejména polypropylen a polyamidy [2, 16].

## 1.3 Kompozitní systémy

Podle moderní definice se kompozitním systémem rozumí heterogenní materiál složený ze dvou nebo více fází, které jsou vzájemně odděleny mezifázovým rozhraním a výrazně se liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Mezi jednotlivými fázemi kompozitního systému je snahou vyvolat tzv. synergický efekt<sup>1.2)</sup>, jehož existence vede k získávání materiálů, které mají kvalitativně zcela nové vlastnosti. Vždy je v kompozitním systému jedna fáze spojitá, taková fáze se nazývá matrice. Fáze, která je nespojitá, se nazývá výztuž (disperze) a v porovnání s matricí má výrazně lepší mechanické vlastnosti. Předchozí definici lze rozšířit o jednu z hlavních charakteristik kompozitních materiálů; nikdy nejsou univerzální a jsou navrhovány výhradně pro konkrétní použití [1, 2, 16].

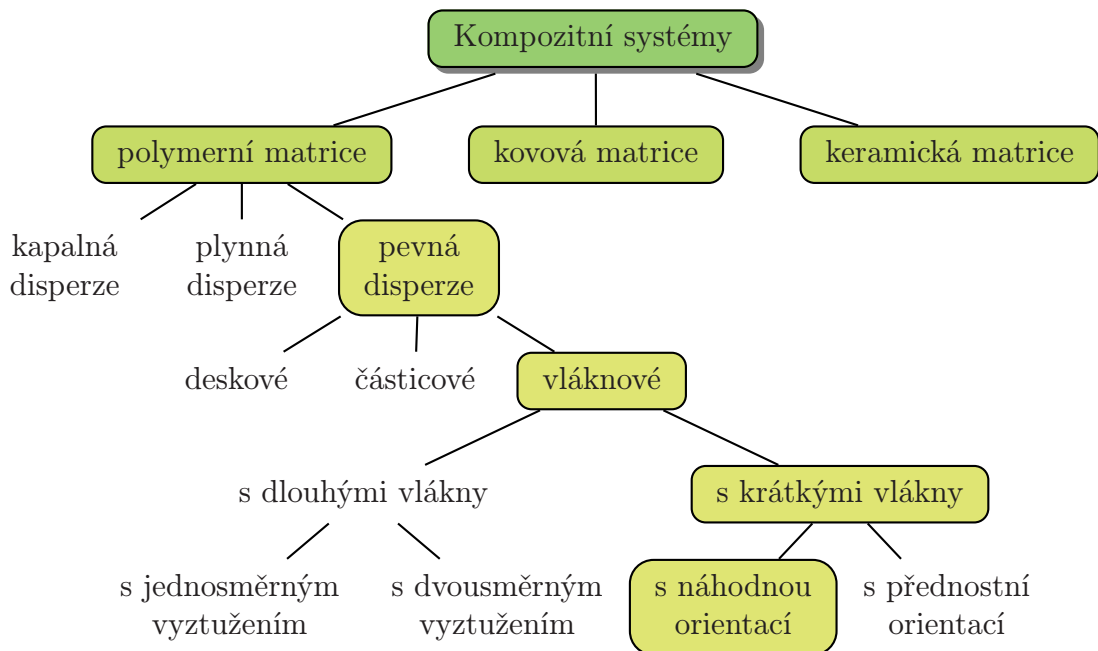
### 1.3.1 Rozdělení kompozitních systémů

Kompozitní systémy lze klasifikovat podle celé řady parametrů a hledisek. Nejčastěji se však používá rozdělení podle typu matrice, druhu dispergované složky a struktury nebo geometrického charakteru výztuže [2, 16].

---

<sup>1.2)</sup>Efekt společného působení, součinnosti. Vlastnosti kompozitního systému jsou lepší než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Synergický účinek lze naznačit vztahem  $2 + 3 = 8$ .

Na obr. 1.3 je znázorněna část uvedeného dělení s vyznačením kompozitních systémů, o kterých tato práce pojednává.



Obr. 1.3: Schéma rozdělení kompozitních systémů [1, 2]

### 1.3.2 Vláknové kompozitní systémy

Použitím vyztužujících vláken v kompozitních systémech se zvyšuje především Youngův modul pružnosti v tahu a mez pevnosti v tahu. Vláknové kompozitní materiály také úspěšně odolávají nejen vysokým mechanickým napětím, ale i nepříznivým způsobům zatěžování (např. rázové nebo dynamické namáhání). Uvedené chování je dáno různými způsoby pohlcování a rozptylování energie, která se na mezifázovém rozhraní z velké části spotřebuje na vytahování vláken z matrice a trhání [14, 16].

## 1.4 Mezifázové rozhraní a možnosti jeho ovlivnění

Pro aplikaci přírodních rostlinných vláken jako vláken vyztužujících jsou důležité nejen jejich mechanické parametry, ale také kvalita vytvářeného mezifázového rozhraní, neboť jsou spojovány dva odlišné materiály — hydrofilní vlákno a většinou hydrofobní polymerní matrice. Mezifázové rozhraní mezi vlákny a matricí je důle-

žitý faktor ovlivňující mechanické vlastnosti a chování kompozitního systému. Je zodpovědné za přenos zatížení z matrice na vyztužující vlákna, která pak přispívají větší mírou hlavně k pevnosti kompozitního systému. Mezifázové rozhraní může být ovlivňováno fyzikálními nebo chemickými metodami. Tyto modifikační metody jsou rozdílné svojí efektivitou adheze mezi vyztužujícím vláknem a matricí [1, 6].

### 1.4.1 Fyzikální metody — studené plazma

Mezi fyzikální metody patří např. natahování vláken, kalandrování nebo speciální tepelné metody, při kterých se nemění chemické složení vláken. Fyzikálním způsobem se mění strukturní a povrchové vlastnosti vláken, čímž se ovlivňuje mechanická vazba k polymerní matici [6].

Další cestou fyzikálních úprav je využití elektrického výboje (např. koronový nebo studený plazmový výboj). Úprava koronovým výbojem je jednou z nejzajímavějších technik pro povrchovou oxidační aktivaci. Při tomto procesu se mění povrchová energie vláken, která úzce souvisí s jejich hydrofilitou. Stejný efekt je dosahován úpravou povrchu studeným plazmatem. Zmíněné metody elektrického výboje jsou známé jako velmi efektivní pro tzv. „neaktivní“ polymerní matrice jako jsou polyethylen, polypropylen (PP), polystyren atd. [6].

Úprava studeným plazmatem nabízí nový přístup k modifikaci povrchu polymerní matrice. Techniky studeným plazmatem jsou procesy suché, čisté a bez vlivů na životní prostředí. Jednou z hlavních výhod tohoto přístupu je, že modifikace je omezena pouze na povrch materiálu. Správný výběr počátečního složení a vnějších parametrů plazmatu (výkon, tlak a doba modifikace) dovoluje vytvoření požadovaných charakteristických rysů na povrchu polymerní matrice. V závislosti na typu a charakteru použitých plynů může být dosaženo různé povrchové modifikace. Může být zavedeno povrchové zesíťování, snížení nebo zvýšení povrchové energie, mohou být vytvořeny reaktivní skupiny nebo radikály [27].

#### Studené plazma

Studené plazma, resp. nízkoteplotní plazma, je částečně ionizovaný plyn tvořený směsí elektricky nabitých a neutrálních částic nacházejících se v rozličných kvantových stavech, které na sebe navzájem působí a udržují celkový kvazineutrální stav. Kvazineutralitou rozumíme takový stav plazmatu, kde v dostatečně velkém objemu,

charakterizovaném Debyeovou stínící vzdáleností, je přibližně stejný počet kladných a záporně nabitých částic. Teplota elektronů je řádově  $10^4$  K, kdežto teplota iontů je přibližně rovna teplotě okolí [22].

## Použití

Studené plazma lze použít na celou řadu aplikací. U kompozitních systémů s polymerní maticí je prostřednictvím studeného plazmatu umožněno zvýšit především povrchovou smáčivost, mechanickou pevnost z hlediska adheze mezi vláknennou vyztuží a maticí nebo naopak snížit navlhavost hydrofilních materiálů za účelem přispůsobení specifickým požadavkům [7].

### 1.4.2 Chemické metody — vazná činidla

Jsou-li dva materiály nekompatibilní, použije se často materiálu třetího, který se pak stává materiálem spojovacím, tzv. vazným.

Tohoto způsobu využívají všechny chemické metody, mezi které patří zejména roubovaná kopolymerace, což je reakce inicializovaná volnými radikály. Povrch vyztužujících vláken je upravován takovou složkou, která vytváří „chemický most“ mezi vláknem a polymerní maticí. Tímto způsobem se zajišťuje zvýšení mezifázové adheze. Vývoj definitivní teorie mechanismu materiálového spojení tohoto typu je však rozsáhlou komplexní problematikou. Zavedení pouze chemických vazeb není možné. Jako nezbytné se jeví zavedení i dalších vlivů (např. morfologie fáze, reakce na mezifázové rozhraní, navlhavost a povrchová energie). Povrchová energie se úzce vztahuje k hydrofilitě vláken [6].

#### Triazinová vazná činidla

Triazinové deriváty tvoří kovalentní vazby s celulóзовými vlákny za vzniku pevných vazeb mezi vyztužujícími vlákny a maticí. Zpracováním celulóзовých vláken triazinovými deriváty dochází také k omezení absorpce atmosférické vlhkosti [6].

#### Organosilanová vazná činidla

Organosilanová vazná činidla, tzv. organosilany, jsou hlavní skupinou vazných činidel využívanou především u polymerních matic vyztužených skelnými vlákny. Byla vyvinuta za účelem spojování prakticky jakéhokoliv polymeru s minerálními

plnivý, která jsou využívána jako výztuž v kompozitních systémech [6]. Použitím organosilanů lze výrazně zlepšit smáčení a adhezi vyztužujících vláken k matici, a tím zvýšit pevnost výsledného kompozitního materiálu [2]. Analogicky ke skelným vláknům jsou organosilany používány jako vazebné prostředky pro přírodní vlákna v kompozitním systému s polymerní maticí [6].

Většina organosilanových vazných činidel může být reprezentována následujícím vzorcem [6]:



kde R funkční organická skupina reagující s polymerní maticí,

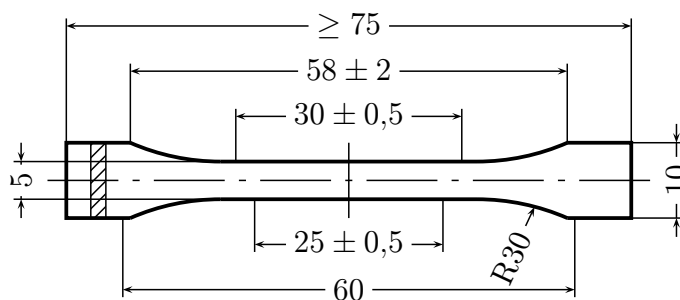
(OR') hydrolizovatelná alkoxy skupina reagující s povrchem vlákna.

Teorie a použití úpravy přírodních vláken organosilany jsou zatím protichůdné, proto je nezbytný jejich další rozsáhlý výzkum [6].

## 1.5 Testovací metody

### 1.5.1 Tahová zkouška

Statická zkouška jednoosým tahem je nejjednodušší a nejrozšířenější normalizovaná<sup>1.3)</sup> mechanická zkouška. Je nutná téměř u všech technických materiálů, protože jí lze získat některé základní mechanické parametry (např. modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu, celkové prodloužení při přetržení a Poissonův poměr). V případě kompozitních systémů s polymerní maticí je tahová zkouška nejčastěji prováděna na plochých zkušebních tělesech [1].



Obr. 1.4: Tvar zkušebního tělesa typu 1BA [29]

<sup>1.3)</sup>Pro plasty ČSN EN ISO 527-1 až ČSN EN ISO 527-4.



## Podstata zkoušky a definice

Mechanické vlastnosti polymerů zjišťované tahovou zkouškou závisí na struktuře plastu, tvaru zkušební tělesa, rychlosti zatěžování, podmínkách kondicionace a zkoušení [4]. Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho přetržení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo poměrné prodloužení dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení. Zkouška se obvykle provádí ve stejném prostředí, v němž bylo provedeno kondicionování zkušebních těles [28].

**Napětí v tahu  $R$**  tahová síla vztažená na jednotku plochy původního průřezu pracovní části zkušební tělesa, působící na zkušební těleso v průběhu zkoušky

$$R = \frac{F}{S_0}. \quad (1.1)$$

**Napětí na mezi kluzu v tahu  $R_e$**  první hodnota napětí, při které dochází ke zvyšování prodloužení bez zvyšování napětí (viz obr. 1.5).

**Napětí na mezi pevnosti v tahu  $R_m$**  maximální napětí v tahu, působící na zkušební těleso během zkoušky (viz obr. 1.5)

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0}. \quad (1.2)$$

**Napětí v tahu při přetržení  $R_B$**  napětí v tahu, při kterém dochází k přetržení zkušební tělesa (viz obr. 1.5).

**Poměrné prodloužení  $\varepsilon$**  zvětšení vztažené délky zkušební tělesa na jednotku počáteční měřené délky

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}. \quad (1.3)$$

**Poměrné prodloužení na mezi kluzu v tahu  $\varepsilon_e$**  poměrné prodloužení odpovídající napětí na mezi kluzu v tahu (viz obr. 1.5).

**Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_m$**  poměrné prodloužení odpovídající napětí na mezi pevnosti v tahu (viz obr. 1.5).

**Jmenovité poměrné prodloužení  $\varepsilon_t$**  zvětšení vztažné délky zkušebního tělesa na jednotku původní vzdálenosti čelistí

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L}. \quad (1.4)$$

**Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení  $\varepsilon_{tB}$**  jmenovité poměrné prodloužení odpovídající napětí při přetržení (viz obr. 1.5).

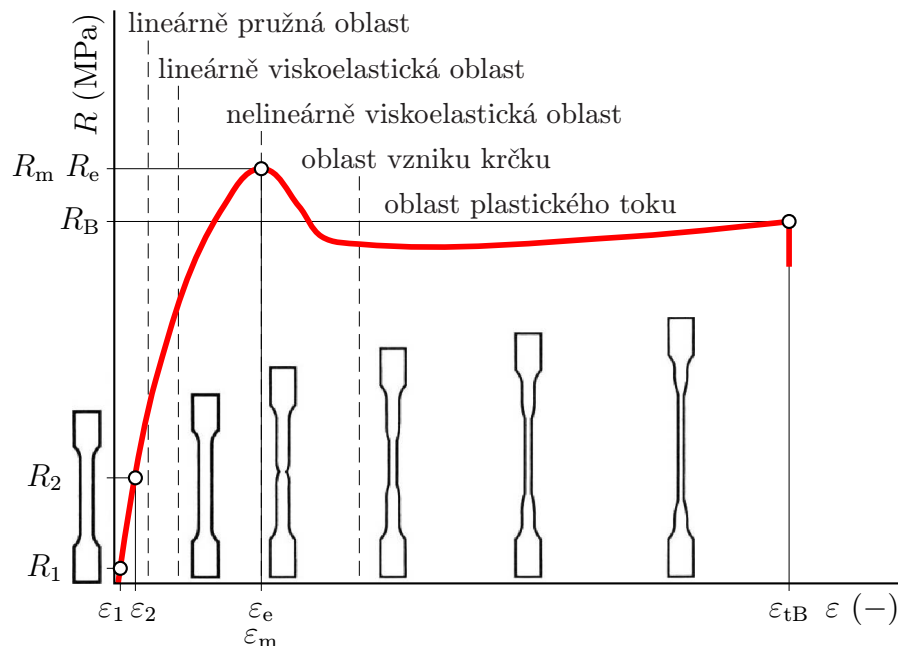
**Celkové prodloužení při přetržení  $A_t$**  celkové prodloužení počáteční měřené délky v okamžiku přetržení vyjádřené v procentech počáteční měřené délky

$$A_t = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100. \quad (1.5)$$

**Modul pružnosti v tahu  $E_t$**  poměr rozdílu napětí a odpovídajícího rozdílu poměrných prodloužení

$$E_t = \frac{R_2 - R_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (1.6)$$

**Tahová křivka** znázorněná na obr. 1.5 vyjadřuje závislost poměrného prodloužení na napětí (nebo změny délky na zatěžující síle).



Obr. 1.5: Tahová křivka semikrystalického termoplastu [5, 28]

## 1.5.2 Rastrovací elektronová mikroskopie

Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) využívá svazku elektronů, jímž je rastrován zkoumaný povrch vzorku [16, 21].

Mezi nesporné výhody SEM patří vysoká rozlišovací schopnost, možnost využití celé řady signálů (např. sekundární elektrony, zpětně odražené elektrony nebo Rentgenovo záření), a také možnost elektronického zpracování informací [21].

Jako nevýhodu lze uvést, že pro klasický detektor sekundárních elektronů nesooucích převážně topografickou informaci musí být vzorek vodivý. Další nevýhodou SEM je omezená velikost vzorku, který musí být zbaven organických nečistot a potřeba poměrně vysokého vakua (řádově  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  Pa) v tubusu a ve vzorkové komoře [21].

### Tvorba obrazu a interpretace signálů

K tvorbě obrazu dochází interakcí primárního svazku elektronů s povrchem vzorku. Vzniká celá řada signálů, které jsou nositeli specifických informací o zkoumaném vzorku, a které lze analyzovat pomocí speciálních detektorů [30, 21].

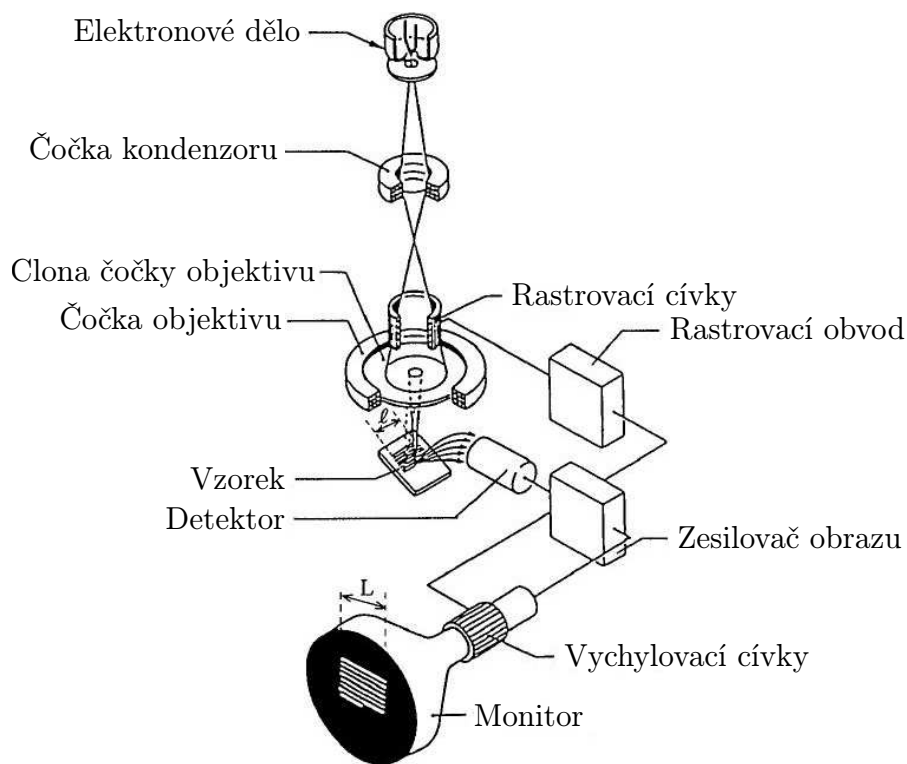
Rozdílnost interakce v konkrétních bodech vzorku je dána jeho charakterem (např. topografie, chemické složení, struktura, magnetické nebo elektrické vlastnosti). Vznik kontrastu je pak dán modulací jasu odpovídajícího bodu na obrazovce změnou intenzity výstupního signálu detektoru [21].

V SEM se na vzniku obrazu podílejí dva druhy kontrastu — chemický a topografický [21]:

- Chemický, který se projeví převážně při zobrazení pomocí zpětně odražených elektronů. Emise zpětně odražených elektronů je úměrná protonovému číslu  $Z$ . Platí, že čím větší rozdíl protonových čísel, tím větší je kontrast.
- Topografický, jehož hlavními nositeli jsou sekundární elektrony. Emise těchto elektronů je funkcí úhlu dopadu primárního svazku elektronů na povrch zkoumaného vzorku. Část povrchu s jinou orientací vůči svazku primárních elektronů emituje jinou hustotu sekundárních elektronů. Tento kontrast závisí i na typu detektoru; použitím vhodného detektoru jej lze zvýšit.

## Popis rastrovacího elektronového mikroskopu

Rastrovací elektronový mikroskop znázorněný na obr. 1.6 se sestává ze zdroje elektronů, tzv. elektronového děla, systému elektromagnetických čoček kondenzoru a objektivu sloužících k fokusaci primárního svazku elektronů. Dále z rastrovacích cívek umožňujících rastrování zkoumaného povrchu vzorku a rastrovacího obvodu, který slouží k synchronizaci pohybu svazku elektronů po vzorku s odpovídajícím bodem na monitoru. Vzorek se umísťuje do vakuové vzorkové komory, ve které jsou umístěny speciální detektory analyzující jednotlivé výstupní signály, které jsou přes zesilovač obrazu vedeny na vychylovací cívky obrazovky, kde dochází ke vzniku kontrastu [21].



Obr. 1.6: Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [30]

## Použití

V materiálovém inženýrství má SEM využití především k mikrostrukturní a mikrofraktografické analýze. Mikrostrukturní analýzou se rozumí studium minoritních fází, prostorových defektů a prostorové morfologie fází. Makrofraktografickou ana-

lýzou je míněno studium vzhledu lomových ploch, souvislost morfologie s mikromechanismem vzniku porušení a identifikace ohniska [21].

## 1.6 Použitá výztuž a matrice

### 1.6.1 Bambus

Bambus (*lat. Arundinaria*) je celoroční rostlina vypadající jako zdřevnatělá tráva, u většiny druhů s dutými stébly, která dorůstá do výšky až několika desítek metrů. Převážná většina bambusů se vyskytuje v přírodní vegetaci tropických a subtropických oblastí, najdou se však i druhy rostoucí v mírném podnebném pásmu. Vzhledem k jeho kvalitním vlastnostem jako je specifická pevnost, vysoká mez pevnosti v tahu a jiným faktorům jako je nízká cena a snadná dostupnost, bambus stále přitahuje pozornost vědců a konstruktérů pro jeho použití nejen jako výztuže kompozitních systémů [26].



#### Mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti

Bambus má vynikající mechanické vlastnosti, které jsou srovnatelné s jednosměrnými kompozitními systémy s polymerní matricí vyztuženou skelnými vlákny [8]. Měrná hmotnost vlákna je  $0,78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [12]. Nejdůležitější mechanické a chemické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1.1.

$E_t$ (MPa)	$E_m$ (MPa)	vlhkost (%)	celulóza (%)	hemicelulóza (%)	lignin (%)
12 000	370	12	48	25	21

Tab. 1.1: Mechanické parametry a chemické složení vlákna bambusu [12, 15]

#### Použití

V zemích původu nacházejí bambusy použití převážně ve stavebnictví jako náhrada ocelových prutů ve vyztuženém betonu nebo materiál na celé stavby [26]. V poslední době našel také uplatnění jako výztuž kompozitních systémů s polymerní matricí používaných nejen v automobilovém průmyslu.

## 1.6.2 Konopí seté

Konopí seté (*lat. Cannabis sativa*) je jednoletá dvoudomá rostlina s dlouhým stonkem a tenkými rozloženými listy [20, 33], která zaznamenává v posledních několika letech opět velký zájem o pěstování. Vyskytuje se téměř v každém klimatu celé Evropy a Asie. To dosvědčuje nárůst jeho pěstitelských ploch v tak klimaticky odlišných zemích jako je Španělsko, Německo nebo Finsko. Jako perspektivní obnovitelná surovina poskytuje v různých odrůdách vláknennou surovinu pro široký sortiment textilních a netextilních výrobků. Vedle přádného lnu patří technické konopí k nejvýznamnějším přádným rostlinám mírného pásma. Nejvyšší vlákno dávají stonky tenké a dlouhé, sklizené v období plného květu [31]. Získávání vlákna je podobné výrobě lněného vlákna [20].<sup>1.4)</sup>



### Mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti

Elementární vlákna mají tupé nebo rozeklané konce, jejich průměr se pohybuje kolem  $22 \mu\text{m}$  a délka kolem 20 mm v závislosti na podmínkách růstu. Délka technického vlákna je 1 až 2 m [20]. Měrná hmotnost je  $1,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [25]. Nejdůležitější mechanické a chemické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1.2.

$E_t$ (MPa)	$E_m$ (MPa)	vlhkost (%)	celulóza (%)	hemicelulóza (%)	lignin (%)
70 000	550–900	11	74	18	4

Tab. 1.2: Mechanické parametry a chemické složení vlákna konopí [10, 25]

### Použití

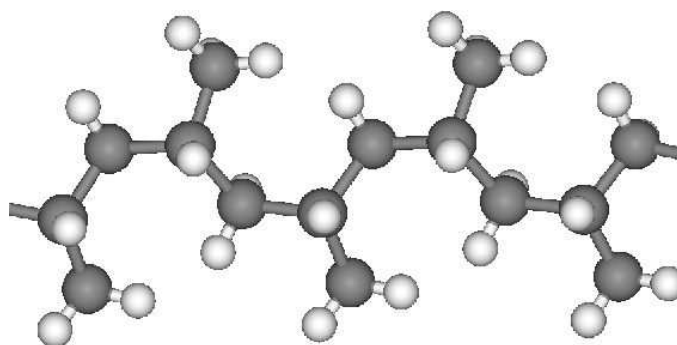
Technické konopí pro svá pevná a odolná vlákna našlo uplatnění v celé řadě nejrozličnějších oblastí. Zejména se používá pro výrobu technických textilií (např. lan, motoužů, dopravních pásů, plachtovin, pytlů), v neposlední řadě i jako vyztužující

<sup>1.4)</sup>Prvotní zpracování spočívá v posečení, zkrácení stonku a jeho vyložení k rosení na poli. Při procesu rosení, který lze uspíšit máčením, se za působení vlhkosti, slunečního záření a černé plísně rozloží pektiny. Po několika týdnech rosení je stonk mechanicky sebrán. Po rosení a máčení se zpracovává v tírnách, kde se dřevnaté části přelámou a drtí. Další část výrobního procesu se nazývá potírání. Potíráním se vlákno načechrá a zbaví se rozdrčené dřeviny. Poslední částí je valchování, což je počesávání vláken a získávání vláken stejně dlouhých.

prvek kompozitních systémů nejen pro automobilový průmysl (např. výrobu termoplastických a reaktoplastických lisovaných dílců používaných jako obklady dveří a zavazadlových prostorů) [20, 31, 32].

### 1.6.3 Polypropylen

PP znázorněný na obr. 1.7 je semikrystalický termoplastický polymer, vykazující relativně nižší pevnost a tuhost, ale velkou houževnatost. Vyrábí se stereoregulární kationtovou polymerací monomeru propylenu a výsledný produkt obsahuje přes 90 % izotaktického a syndiotaktického polymeru, zbytek je ataktický rozdíl. Společně s polyethylenem je základním představitelem největší skupiny syntetických polymerů, tzv. polyolefinů [17].



Obr. 1.7: Prostorový model polypropylenu

#### Chemické vlastnosti

PP vyniká velmi dobrou chemickou odolností vůči kyselinám, zásadám a korozi za napětí, i přesto, že podíl krystalické fáze dosahuje jen asi 50 až 70 %. V některých nepolárních organických rozpouštědlech (např. toluen, trichlorbenzen, trichlorethan nebo xylen) se začíná rozpouštět teprve až při zvýšené teplotě [3, 17].

#### Fyzikální vlastnosti

Vzhledem ke svému stupni krystalinity je mléčně zakalený a lehčí než voda, jeho měrná hmotnost je  $0,91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , čímž patří mezi nejlehčí kompaktní polymery. Teplota použitelnosti je do 120 až 130 °C a teplota tání krystalitů se pohybuje v rozmezí od 160 do 170 °C. PP vykazuje nízkou odolnost proti ultrafialovému záření, oxidaci a neodolává účinkům povětrnostních vlivů [3, 17].

## Mechanické vlastnosti

Mez pevnosti v tahu **PP** se pohybuje v rozmezí od 26 do 38 MPa a Youngův modul pružnosti v tahu od 1 100 do 1 600 MPa. Při standardní pokojové teplotě vykazuje dobrou rázovou i vrubovou houževnatost, ale při nižší teplotě než 0 °C se stává křehký, což odpovídá teplotě skelného přechodu. Vykazuje značný creep [3, 17].

## Zpracování

**PP** se zpracovává mnoha technologiemi např. vstřikováním, vstřikováním s vyfukováním, vytlačováním, tvarováním nebo lisováním [19].

## Použití

**PP** pro výhodnou kombinaci ceny a užitých vlastností našel uplatnění v řadě aplikací. Používá se převážně jako matrice kompozitních systémů s částicovou nebo vláknennou výztuží. Z výrobků lze zmínit např. lopatky ventilátoru, vrtule, vlákna, komponenty klimatizačních jednotek, přístrojové desky, nárazníky, víka zavazadlového prostoru nebo plastové díly pro spotřební průmysl [3].



# Kapitola 2

## Experimentální část

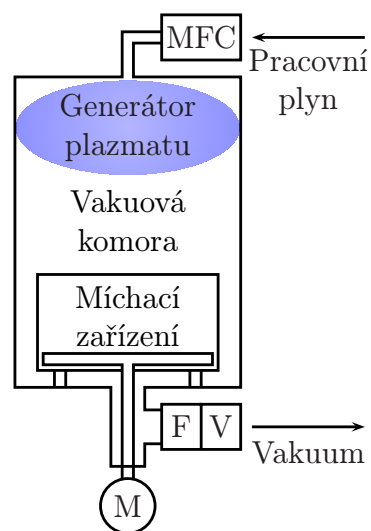
V prvním oddílu této kapitoly je popsána aparatura a parametry studeného plazmatu, za kterých probíhala modifikace povrchu práškového polymeru. V následujícím oddíle je popsána příprava zkušebních těles pro stanovení tahových vlastností. Závěr této kapitoly je věnován stanovení tahových vlastností jednotlivých kompozitních systémů a SEM analýze lomových ploch.

### 2.1 Modifikace povrchu práškového polymeru

Pro modifikaci povrchu práškového polymeru (Borealis PP BE170MO; materiálový list viz příl. D) studeným plazmatem bylo použito systému, který je v anglosaské literatuře označován jako downstream.

Výhodou zmíněného systému je, že ke generování plazmatu dochází mimo oblast uložení ovlivňovaného vzorku, a proto je vhodný zejména pro modifikaci tepelně citlivých materiálů [13].

Systém downstream znázorněný na obr. 2.1 se sestává z generátoru plazmatu, recipientu a plynového hospodářství. Generátor plazmatu se dále skládá ze systému zdroje mikrovln a rezonátoru. Systém zdroje mikrovln umožňuje regulaci výkonu magnetronu od 0 do 2000 W s krokem po 100 W a obsahuje jednotku pro časovou regulaci procesu. Čas lze regulovat od



Obr. 2.1: Schéma systému downstream [13]

0 do 99 min 99 s s krokem po 1 s. Frekvence magnetronu je 2,54 GHz. Rezonátor obsahuje systém ladění přenosu mikrovlnného záření do aparatury za účelem maximálního využití přiváděného výkonu. Recipient je válcová nádoba z nerezové oceli opatřená několika přírubami pro připojení různých měřících přístrojů a zařízení. Homogenitu při modifikaci zaručuje systém míchání složený z horizontální míchačky s dvoulistou vrtulí. Plynové hospodářství se sestává z vysokotlaké a vakuové části. Hrubý přívod pracovních plynů je zajištěn přes regulační ventily na tlakových nádobách. Přesné dávkování zajišťuje hmotnostní průtokoměr (MFC), který pracuje v plně automatickém režimu. Prostor vakuové komory je čerpán rotační a Rootsovou vývěvou. Aparatura pracuje při tlacích od 50 do 400 Pa [13].

Parametry při modifikaci: doba modifikace 10 min, tlak pracovního plynu 100 Pa, vzdálenost vzorku od místa generování plazmatu 400 mm, výkon magnetronu 300 W, otáčky během modifikace  $15 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .

## 2.2 Příprava zkušebních těles

### 2.2.1 Sušení přírodních vláken

U přírodních vláken, jakožto vláken hydrofilních, je potřeba snížit adsorbovanou vlhkost, neboť přítomnost vody ve vláknech by se v důsledku odpařování při zpracování projevila poklesem mechanických parametrů výsledného kompozitního systému. Ke snížení atmosférické vlhkosti byla použita vakuová sušárna typu VACULL. Sušení probíhalo po dobu 2 h při teplotě  $80^\circ\text{C}$ . Sušení lze provádět jen do určité vlhkosti, zvané rovnovážná vlhkost, která závisí na okolních podmínkách, tj. teplotě okolí a relativní vlhkosti. Teplota v laboratoři byla  $23^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost 50 %.

### 2.2.2 Lisování desek pro přípravu zkušebních těles

Proces lisování desek pro přípravu zkušebních těles použitých na zkoušku tahem se sestával ze dvou hlavních částí — přípravy dávky hmoty pro lisování a vlastního lisovacího cyklu. Příprava dávky hmoty pro lisování probíhala ve dvoušnekovém hnětacím stroji. Při tomto procesu docházelo nejenom k homogenizaci práškového polymeru s vyztužujícími vlákny, ale také k převedení polymeru do plastického stavu vlivem působení intenzivního smykového namáhání. Proces homogenizace probíhal po dobu 10 min. Průběhy teploty, kroutícího momentu na hřídeli šneku a otáček

šneku jsou uvedeny v příl. A. Naplastikovaná hmota byla následně odebrána ze šneku a vložena na hliníkovou desku formy o teplotě 23 °C. Forma se bez tlaku uzavřela a materiál se po dobu 1 min prohříval. Pak se forma pozvolna uzavřela až na plný lisovací tlak. Proces lisování probíhal na lisu typu FONTJNE HOLLAND při teplotě 200 °C po dobu 1 min a lisovací síle 100 kN. Po skončení lisovacího procesu následovalo chlazení formy vodou. Po ochlazení na teplotu 30 až 40 °C byl uvolněn tlak, otevřena forma a vyjmuta deska o rozměrech 150 × 150 × 1,8 mm. Z vyrobených desek se následně frézovala zkušební tělesa použitá pro zkoušku tahem.

## 2.3 Stanovení tahových vlastností

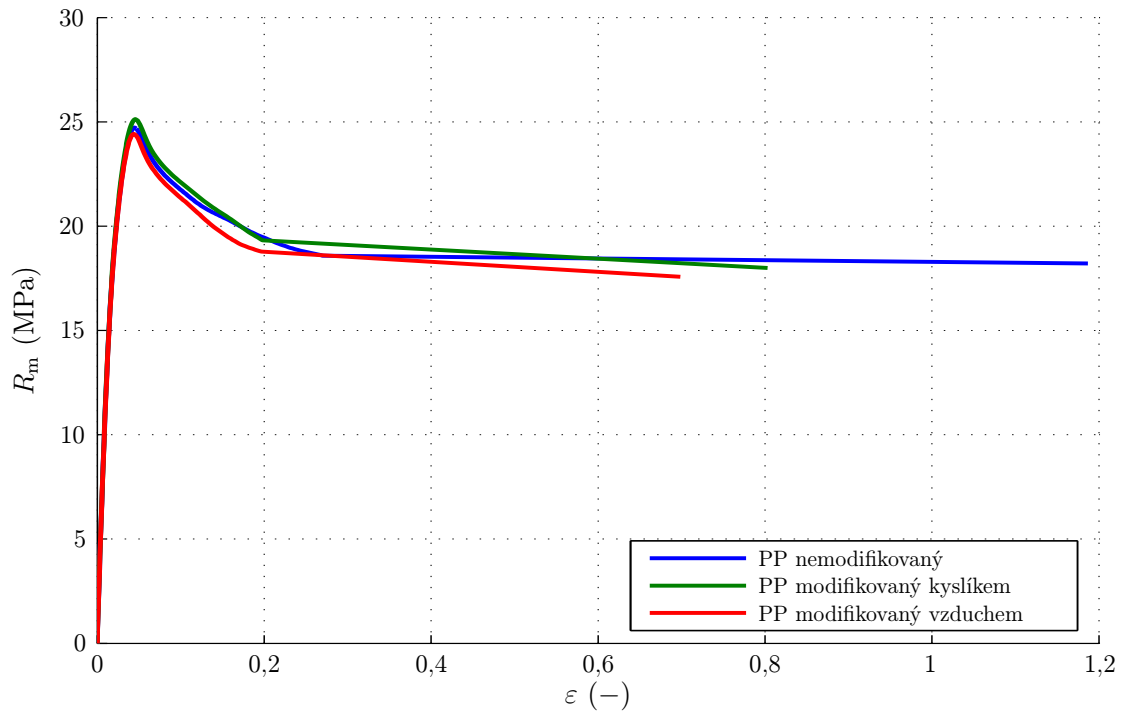
Ke stanovení tahových vlastností kompozitních systémů byl použit počítačem ovládaný elektricko–mechanický zkušební stroj INSTRON 4204 s jmenovitým zatížením 50 kN. Tento zkušební stroj umožňuje vyvinout rychlost zkoušení v rozmezí od 0,05 do 500 mm · min<sup>-1</sup> a jeho maximální vzdálenost upínacích čelistí činí 1,170 m.

Vzorek	$\bar{b}_1$ (mm)	min $b_1$ (mm)	max $b_1$ (mm)	$\bar{h}$ (mm)	min $h$ (mm)	max $h$ (mm)
PP	5,0	4,9	5,1	1,7	1,7	1,8
PP/bambus 70/30	5,4	5,1	5,6	1,8	1,8	1,9
PP/konopí 70/30	5,2	5,0	5,5	1,8	1,7	1,9
PP/bambus 91/9	5,1	4,9	5,3	1,8	1,8	1,9
PP/konopí 91/9	5,4	5,1	5,8	1,7	1,7	1,7
PPk	5,4	5,2	5,6	1,7	1,7	1,8
PPk/bambus 70/30	5,1	5,0	5,3	1,8	1,8	1,9
PPk/konopí 70/30	5,1	5,0	5,2	1,8	1,8	1,9
PPk/bambus 91/9	5,2	5,0	5,4	1,8	1,8	1,9
PPk/konopí 91/9	5,2	5,0	5,4	1,7	1,7	1,8
PPv	5,2	5,1	5,3	1,8	1,8	1,8
PPv/bambus 70/30	5,3	5,2	5,5	1,8	1,8	1,8
PPv/konopí 70/30	4,9	4,6	4,9	1,8	1,8	1,8
PPv/bambus 91/9	5,0	4,6	5,3	1,8	1,8	1,9
PPv/konopí 91/9	5,0	4,8	5,1	1,8	1,7	1,8

Tab. 2.1: Rozměry pracovních částí zkušebních těles typu 1BA

Pro tahovou zkoušku bylo použito 10 zkušebních tělesech typu 1BA, ze kterých byly dle vztahů (1.1) až (1.6) vypočítány základní mechanické parametry. Rozměry pracovních částí zkušebních tělesech, včetně průměrných, minimálních a maximálních hodnot jsou uvedeny v tab. 2.1. Pro všechna zkušební tělesa byla vztažná délka 60 mm, rychlost zkoušení  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a horní limit zatížení 0,5 kN. Teplota v laboratoři byla  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost 50 %.

Tahové křivky čistých polymerních matric jsou znázorněny na obr. 2.2.

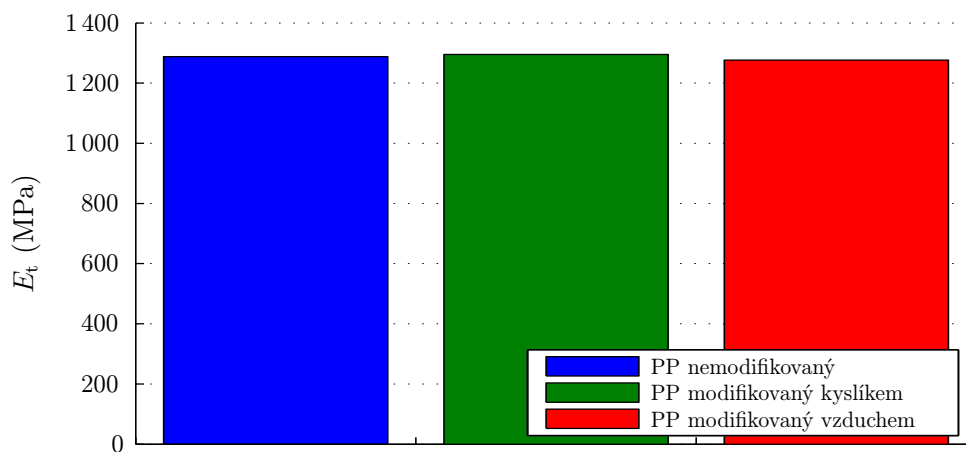


Obr. 2.2: Tahové křivky čisté matrice

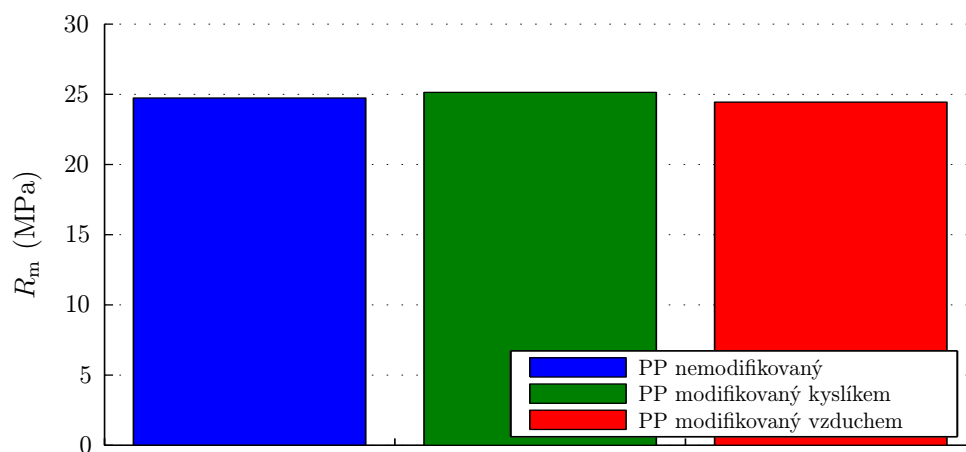
Vybrané mechanické parametry včetně směrodatných odchylek jsou pro čisté polymerní matrice uvedeny v tab. 2.2 a pro srovnání graficky znázorněny na obr. 2.3.

Vzorek	$E_t$ (MPa)	$\sigma_{E_t}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$\sigma_{R_m}$ (MPa)	$A_t$ (%)	$\sigma_{A_t}$ (%)
PP	1 290	22,4	25	0,2	119	138,3
PPk	1 290	47,0	25	0,9	80	57,1
PPv	1 280	21,1	24	0,2	70	65,8

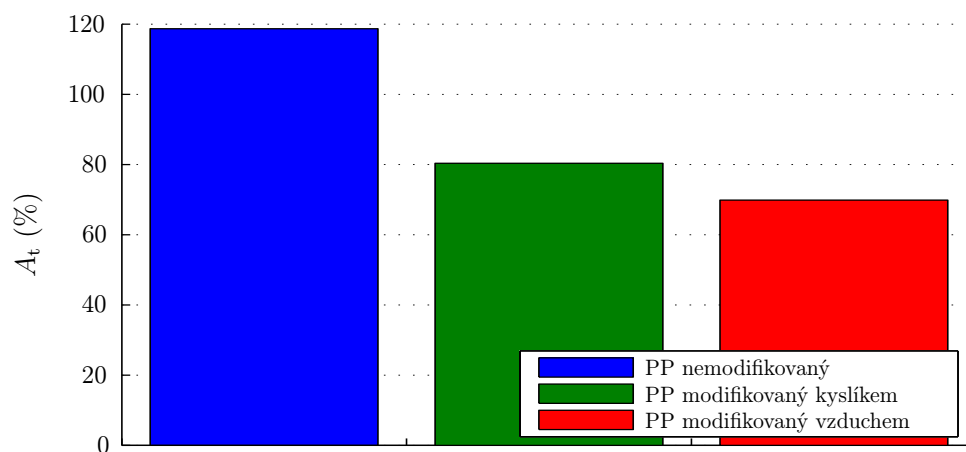
Tab. 2.2: Mechanické parametry čisté matrice



(a) Modul pružnosti v tahu



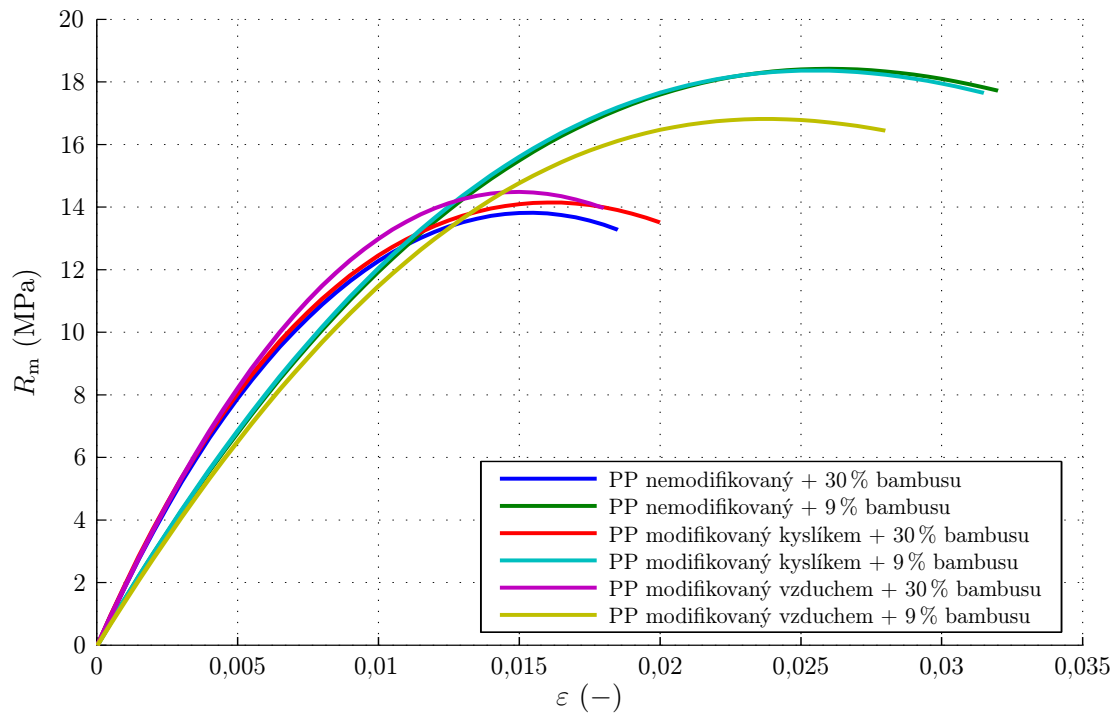
(b) Mez pevnosti v tahu



(c) Celkové prodloužení při přetržení

Obr. 2.3: Srovnání mechanických parametrů čisté matrice

Tahové křivky polymerních matic vyztužených vlákny bambusu jsou znázorněny na obr. 2.4.

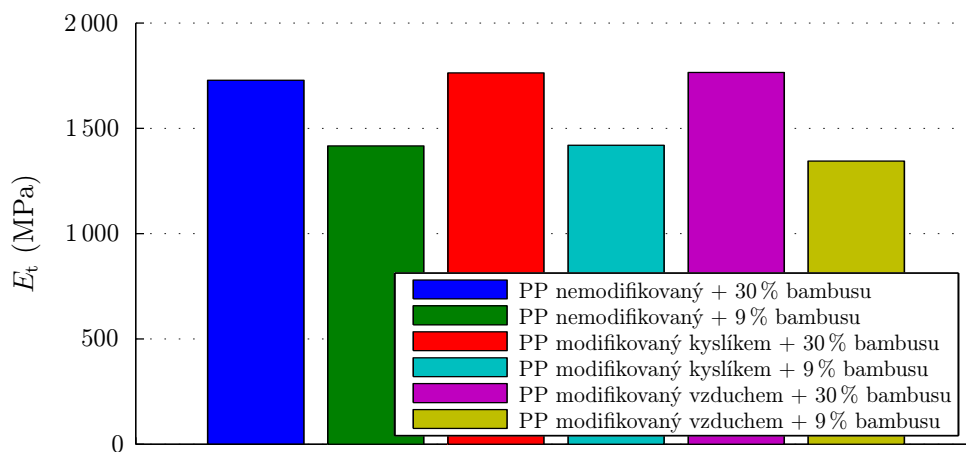


Obr. 2.4: Tahové křivky matrice vyztužené vlákny bambusu

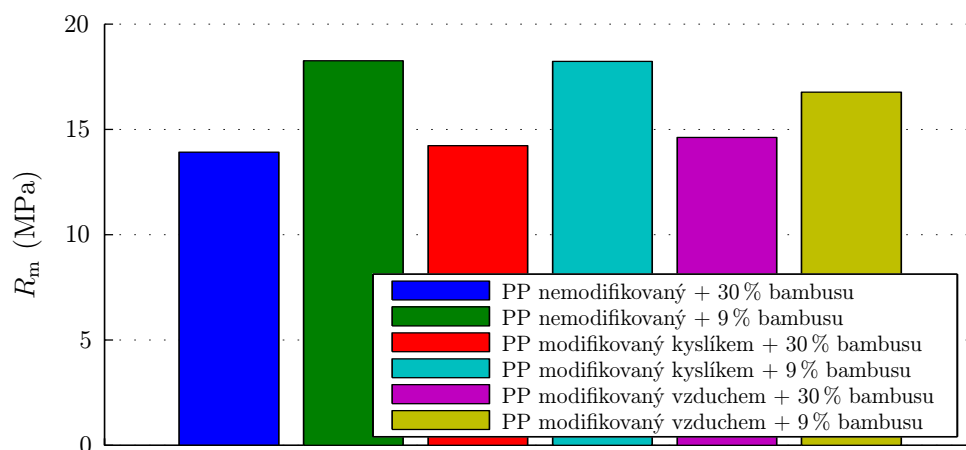
Vybrané mechanické parametry včetně směrodatných odchylek jsou pro polymerní matice vyztužené vlákny bambusu uvedeny v tab. 2.3 a pro srovnání graficky znázorněny na obr. 2.5.

Vzorek	$E_t$ (MPa)	$\sigma_{E_t}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$\sigma_{R_m}$ (MPa)	$A_t$ (%)	$\sigma_{A_t}$ (%)
PP/bambus 70/30	1 730	68,2	14	0,6	2	0,2
PP/bambus 91/9	1 420	26,4	18	1,5	3	0,8
PPk/bambus 70/30	1 760	84,1	14	0,8	2	0,2
PPk/bambus 91/9	1 420	47,7	18	1,9	3	0,9
PPv/bambus 70/30	1 770	63,3	15	0,7	2	0,3
PPv/bambus 91/9	1 340	29,5	17	1,3	3	0,7

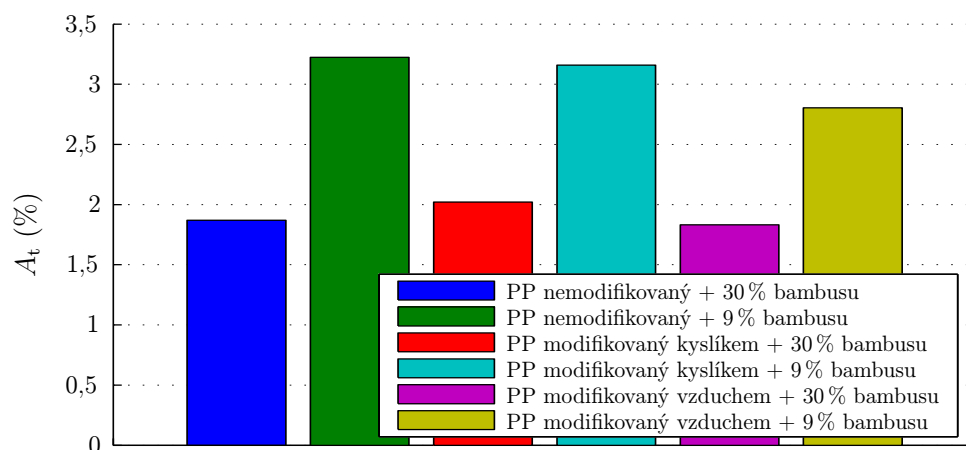
Tab. 2.3: Mechanické parametry matrice vyztužené vlákny bambusu



(a) Modul pružnosti v tahu



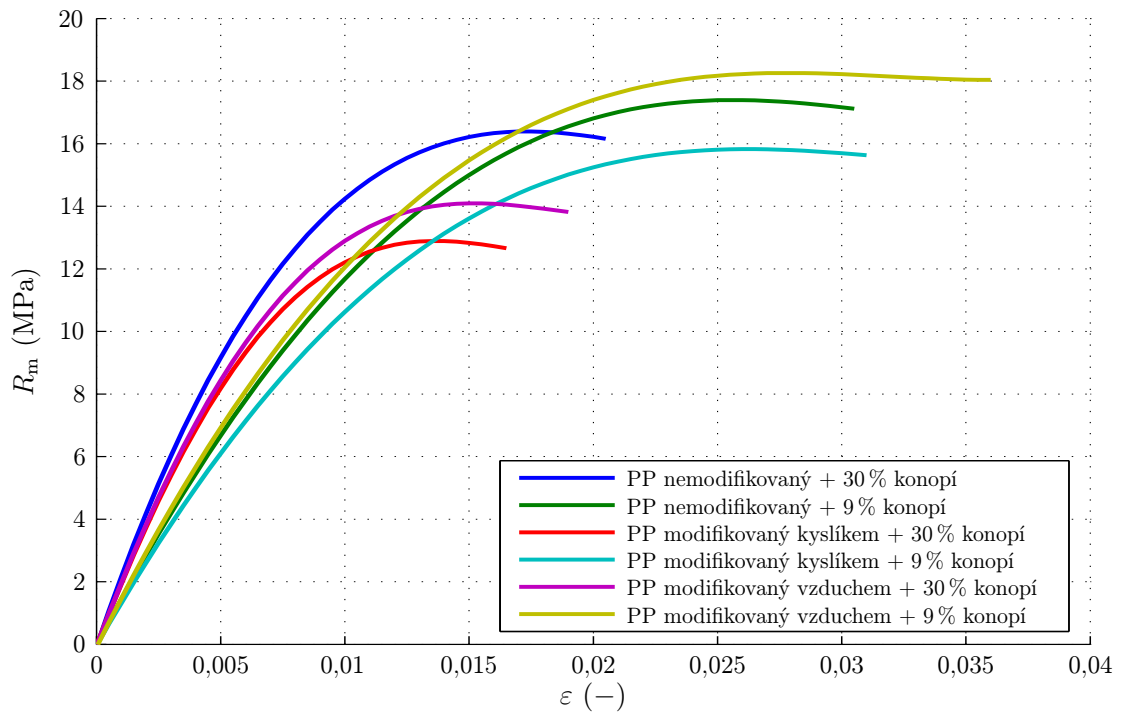
(b) Mez pevnosti v tahu



(c) Celkové prodloužení při přetržení

Obr. 2.5: Srovnání mechanických parametrů matrice vyztužené vlákny bambusu

Tahové křivky polymerních matic vyztužených vlákny technického konopí jsou znázorněny na obr. 2.6.



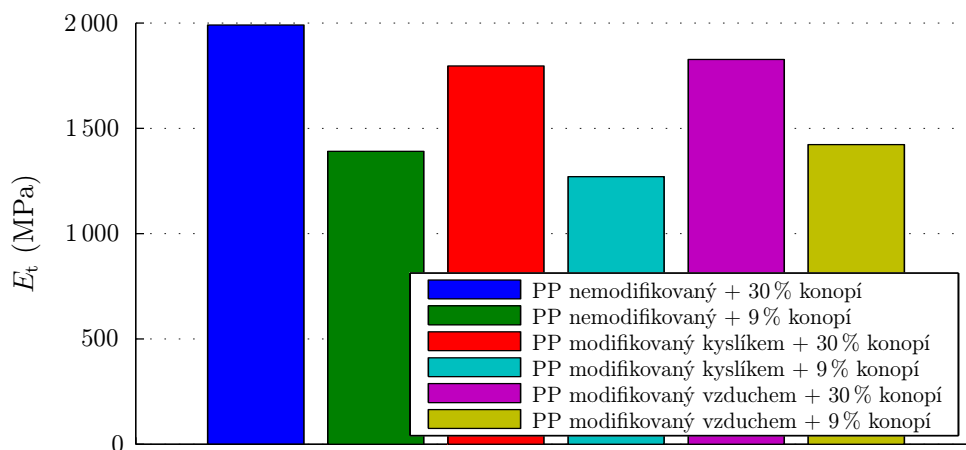
Obr. 2.6: Tahové křivky matrice vyztužené vlákny konopí

Vybrané mechanické parametry včetně směrodatných odchylek jsou pro polymerní matrice vyztužené vlákny konopí uvedeny v tab. 2.4 a pro srovnání graficky znázorněny na obr. 2.7.

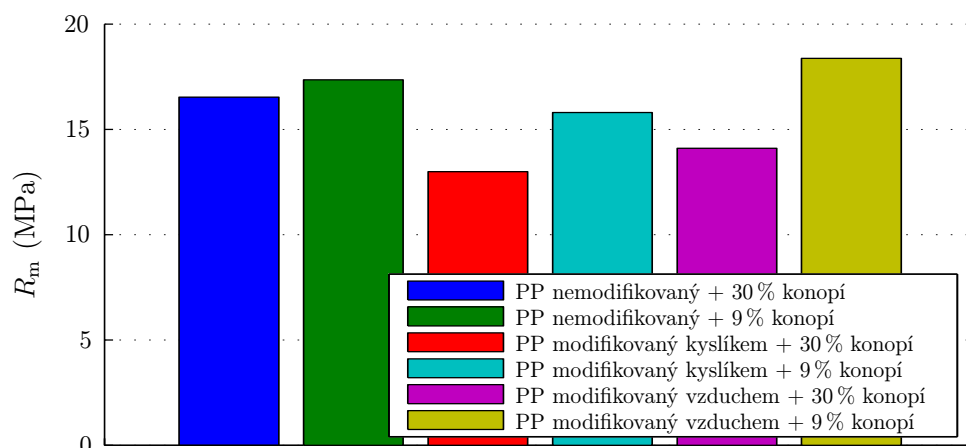
Vzorek	$E_t$ (MPa)	$\sigma_{E_t}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$\sigma_{R_m}$ (MPa)	$A_t$ (%)	$\sigma_{A_t}$ (%)
PP/konopí 70/30	1990	107,5	17	1,2	2	0,2
PP/konopí 91/9	1390	70,4	17	1,5	3	0,8
PPk/konopí 70/30	1790	42,0	13	1,0	2	0,4
PPk/konopí 91/9	1270	58,7	16	1,0	3	0,5
PPv/konopí 70/30	1830	64,7	14	1,1	2	0,4
PPv/konopí 91/9	1420	50,4	18	1,4	4	0,7

Tab. 2.4: Mechanické parametry matrice vyztužené vlákny konopí

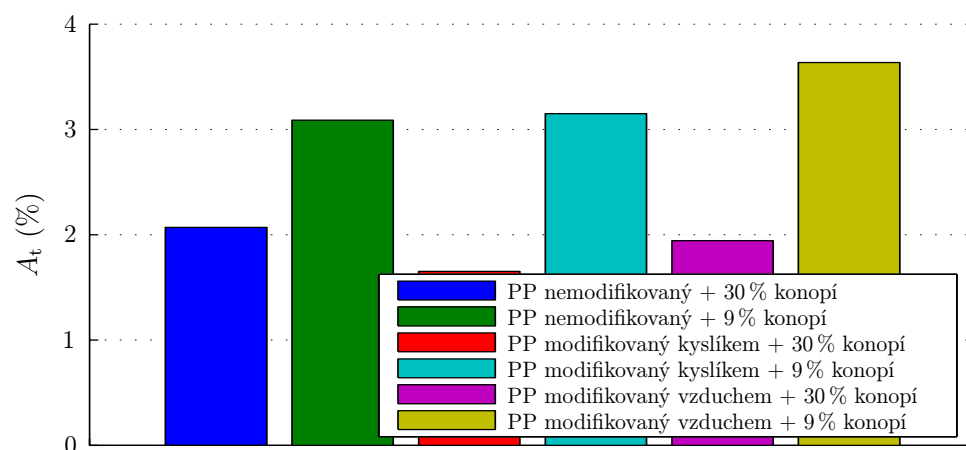




(a) Modul pružnosti v tahu



(b) Mez pevnosti v tahu



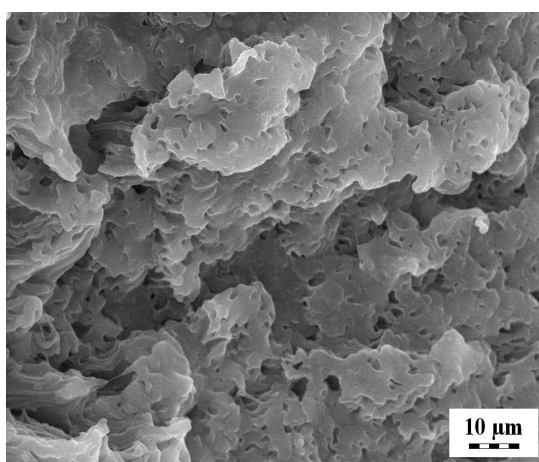
(c) Celkové prodloužení při přetržení

Obr. 2.7: Srovnání mechanických parametrů matrice vyztužené vlákny konopí

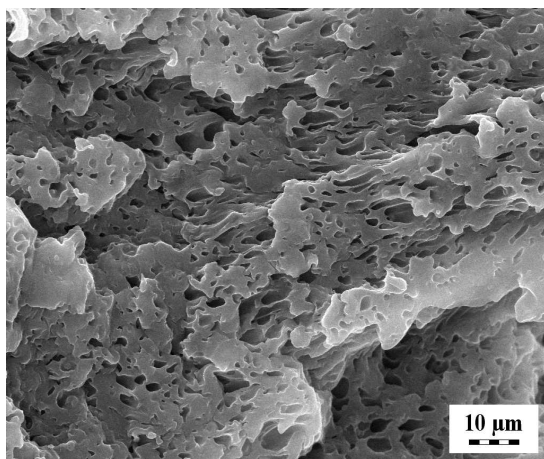
## 2.4 SEM analýza lomových ploch

SEM analýza lomových ploch byla provedena na mikroskopu JEOL JSM 540A s urychlovacím napětím 10 kV. Všechny lomové plochy byly před vlastním pozorováním katodově naprášeny vodivou vrstvou AuPd o tloušťce několika nanometrů.

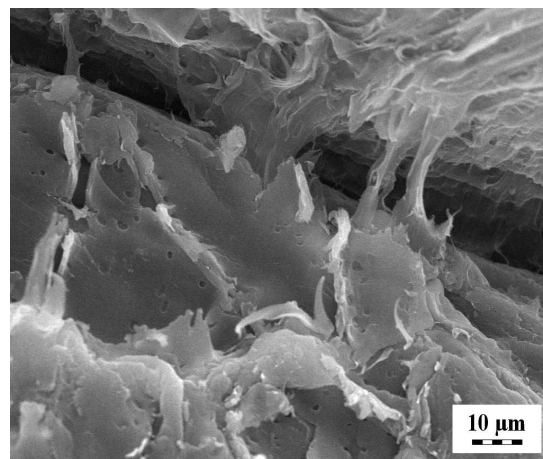
Ze snímků lomových ploch [obr. 2.9(a), obr. 2.9(c), obr. 2.9(e)] a [obr. 2.10(a), obr. 2.10(c), obr. 2.10(e)] jsou při menším zvětšení ( $100\ \mu\text{m}$ ) patrné dutiny, které snižují účinný průřez přenášející zatížení. Při větším zvětšení ( $50\ \mu\text{m}$ ) je ze snímků [obr. 2.9(b), obr. 2.9(d), obr. 2.9(f)] a [obr. 2.10(b), obr. 2.10(d), obr. 2.10(f)] zřejmé, že adheze mezi vyztužujícím vláknem a matricí není významná.



(a) nemodifikovaná

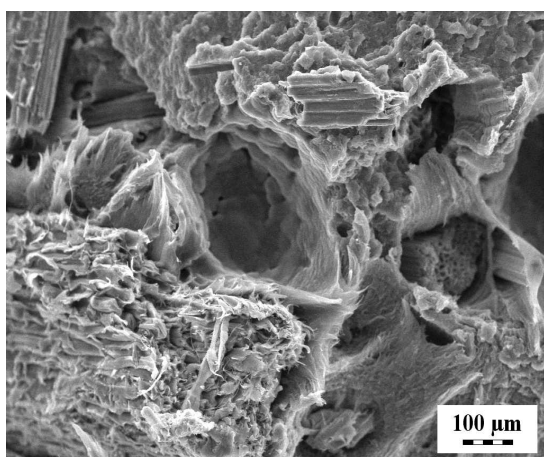


(b) modifikovaná kyslíkem

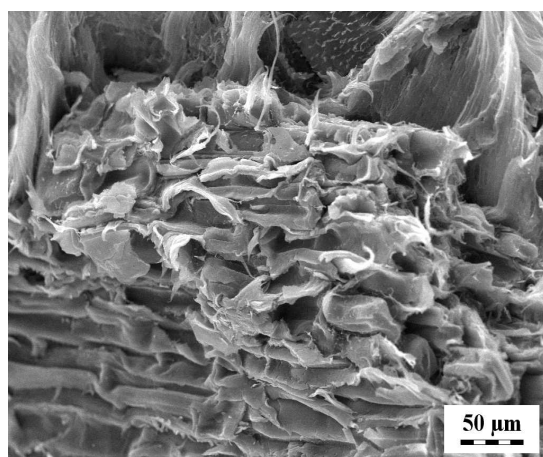


(c) modifikovaná vzduchem

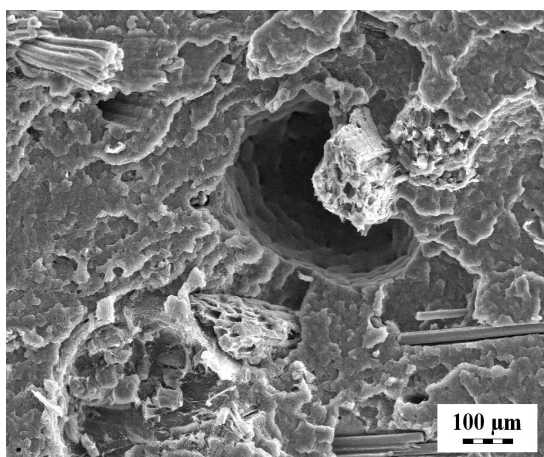
Obr. 2.8: SEM analýza lomových ploch čisté matrice



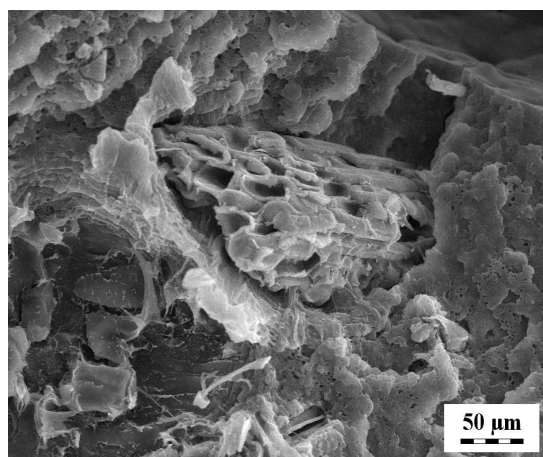
(a) PP+9% výztuže



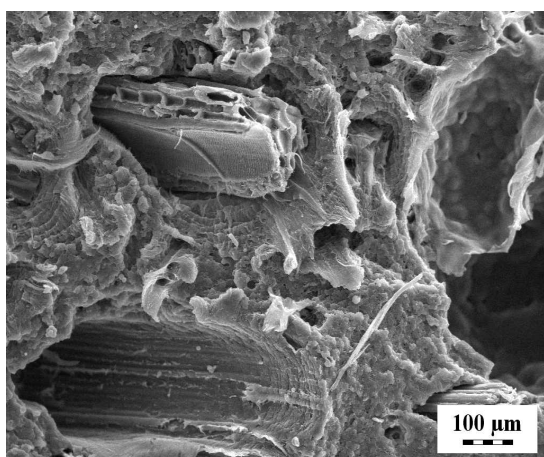
(b) PP+9% výztuže



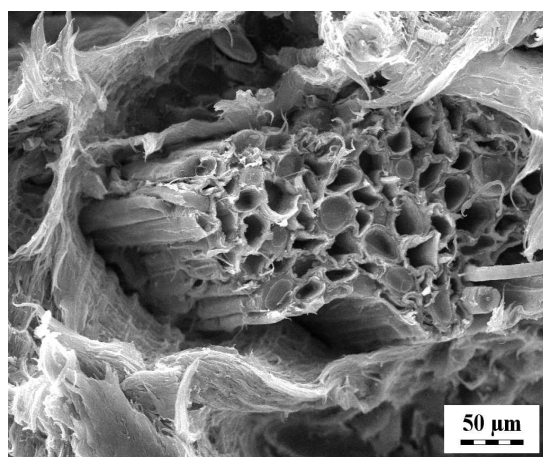
(c) PPk+9% výztuže



(d) PPk+9% výztuže

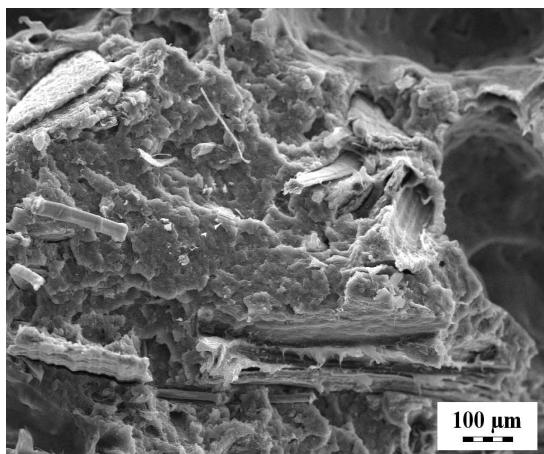


(e) PPv+9% výztuže

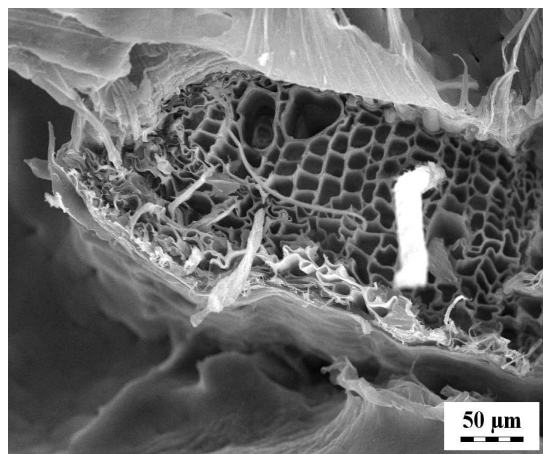


(f) PPv+9% výztuže

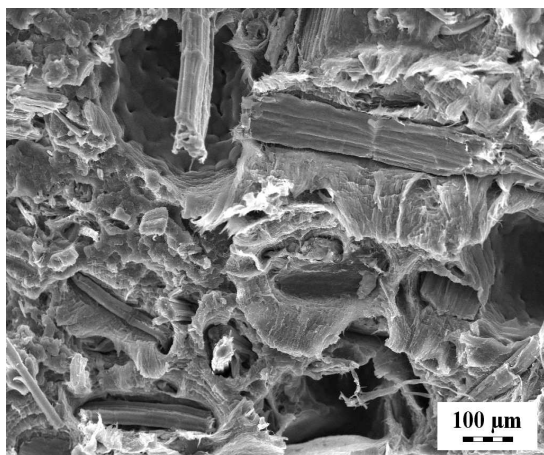
Obr. 2.9: SEM analýza lomových ploch matrice vyztužené vlákny bambusu



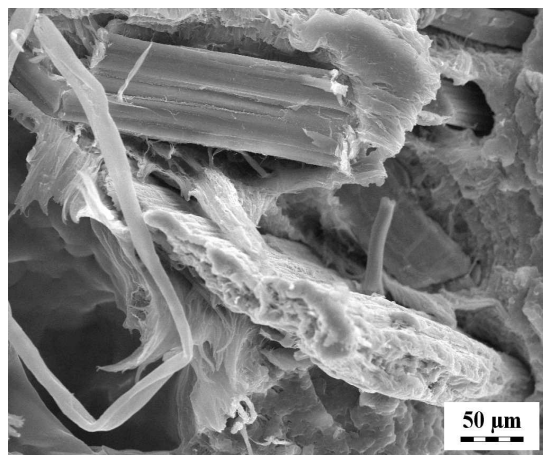
(a) PP+9% výztuže



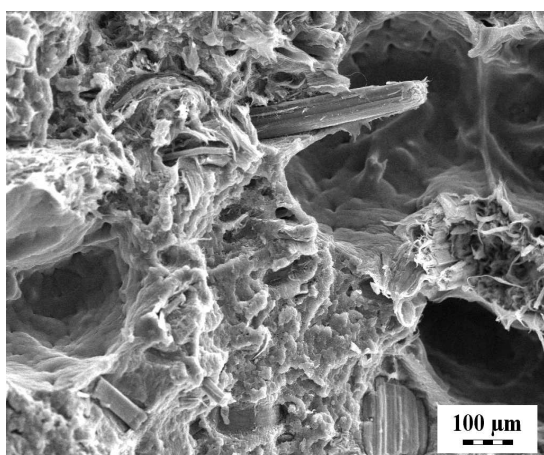
(b) PP+9% výztuže



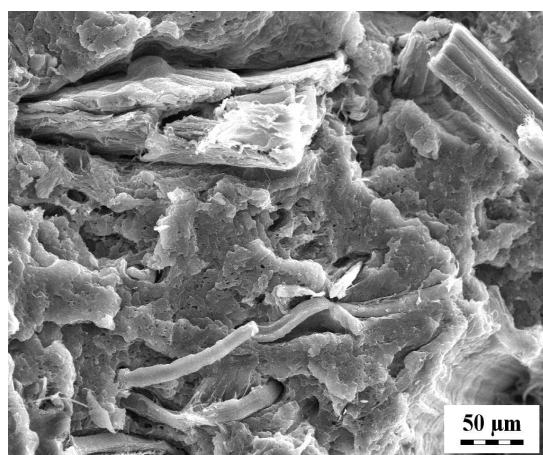
(c) PPK+9% výztuže



(d) PPK+9% výztuže



(e) PPv+9% výztuže



(f) PPv+9% výztuže

Obr. 2.10: SEM analýza lomových ploch matrice vyztužené vlákny konopí

# Kapitola 3

## Diskuse výsledků

### Čistá matrice

V případě čistých polymerních matric bylo nejvyššího modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu dosaženo u polymeru modifikovaného kyslíkovým plazmatem a polymeru nemodifikovaného. Hodnoty se však liší jen v jednotkách MPa, a proto modifikace neměla na tyto mechanické parametry žádný vliv. Nejnižší hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu byly u polymeru modifikovaného vzduchovým plazmatem. V tomto případě měla modifikace na tyto mechanické parametry převážně zhoršující efekt.

Pokud jde o celkové prodloužení při přetržení, zde byl již pozorován vliv modifikace. Nejvyšší hodnota byla u polymeru nemodifikovaného. Modifikací kyslíkovým plazmatem kleslo celkové prodloužení při přetržení o 33 % a modifikací vzduchovým plazmatem o 42 %. To je pravděpodobně způsobeno ultrafialovým zářením, kterým došlo k zesítní polymeru. Při následném mechanickém zatížení pak dochází k rychlejšímu vyčerpání plastické deformace.

U čistých polymerních matric je také dobré si povšimnout statistického vyhodnocení naměřených výsledků. Jak je patrné z Gaussových křivek (příl. C; obr. C.1 až obr. C.3) je největší rozptyl sledovaných mechanických parametrů u polymeru modifikovaného kyslíkovým plazmatem (modul pružnosti a mez pevnosti v tahu) a polymeru nemodifikovaného (celkové prodloužení při přetržení). Tento rozptyl hodnot souvisí s nehomogenitou modifikace, kdy radikály kyslíkové plazmy nemají tak dobrou schopnost pronikat do materiálu.

## Matrice vyztužená vlákny bambusu

V případě kompozitních systémů, kde vyztužujícími elementy byla vlákna bambusu, bylo nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu dosaženo u matric s 30 % výztuže. Nejvyšší modul pružnosti v tahu byl u polymeru modifikovaného vzduchovým a kyslíkovým plazmatem, dále pak u polymeru nemodifikovaného. Modifikací vzrostl modul pružnosti v tahu o 30 MPa, což představuje nárůst o 2 %, který je zanedbatelný. Pokud jde o matrice s 9 % výztuže, zde bylo dosaženo nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu u polymeru modifikovaného kyslíkovým plazmatem a polymeru nemodifikovaného. Nejnižší hodnota modulu pružnosti v tahu byla u polymeru modifikovaného vzduchovým plazmatem. Zde modifikace polymeru nepřinesla vůbec žádný efekt. Porovnáním hodnot modulů pružnosti v tahu matric s 9 % a 30 % výztuže, je zřejmý nárůst řádově stovek MPa, který je však dán vyšším podílem tuhých vláken v matrici, než důsledkem modifikace polymeru.

Z hlediska meze pevnosti v tahu bylo nejvyšších hodnot dosaženo u matric s 9 % výztuže. U matric s tímto podílem výztuže měla modifikace spíše zhoršující vliv, neboť nejvyšší mez pevnosti v tahu byla u nemodifikované matrice. Dále následovala matrice modifikovaná kyslíkovým a vzduchovým plazmatem. V případě matric s 30 % výztuže bylo nejvyšších hodnot meze pevnosti v tahu dosaženo modifikací polymeru vzduchovým plazmatem. Nejnižší hodnoty meze pevnosti v tahu byly u polymeru modifikovaného kyslíkovým plazmatem a polymeru nemodifikovaného. Zde byl vliv modifikace zcela zanedbatelný.

Hodnoty celkového prodloužení při přetržení se liší zanedbatelně. Nejvyšší hodnoty jsou u matric s 9 % výztuže a nejnižší s 30 % výztuže.

## Matrice vyztužená vlákny konopí

V případě kompozitních systémů, kde vyztužujícími prvky byla vlákna technického konopí, bylo nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu dosaženo opět u matric s 30 % výztuže. Nejvyšší modul pružnosti v tahu byl u polymeru nemodifikovaného, dále pak u polymeru modifikovaného vzduchovým a kyslíkovým plazmatem. Z uvedeného je zřejmé, že v tomto případě měla modifikace převážně zhoršující efekt. Pokud jde o matrice s 9 % výztuže, zde bylo dosaženo nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu u polymeru modifikovaného vzduchovým plazmatem a polymeru nemodifiko-

vaného. Nejnižší hodnota modulu pružnosti v tahu byla u polymeru modifikovaného kyslíkovým plazmatem. Zvýšení modulu pružnosti v tahu přinesla modifikace vzduchovým plazmatem. Zvýšení bylo však jen o 70 MPa, což představuje nárůst o 4 %, který je ale zanedbatelný.

Z hlediska meze pevnosti v tahu byly nejvyšší hodnoty u matrice modifikované vzduchovým plazmatem s 9 % výztuže. Dále následovaly nemodifikované matrice s 9 % a 30 % výztuže. Zbylé kompozitní systémy dosahovaly nižších hodnot meze pevnosti v tahu, a proto neměla modifikace matrice zlepšující efekt.

Nejvyšší hodnota celkového prodloužení při přetržení byla dosažena u matrice modifikované vzduchovým plazmatem s 9 % výztuže. Dále následovala matrice modifikovaná kyslíkovým plazmatem a matrice nemodifikovaná, obě s 9 % výztuže. Zbylé kompozitní systémy dosahovaly nižších hodnot celkového prodloužení při přetržení, jak se dalo předpokládat v souladu s teorií vláknových kompozitů.

## Shrnutí

Porovná-li se hodnoty meze pevnosti čistých matric a matric vyztužených přírodními vlákny, je zřejmé, že k očekávanému zvýšení tohoto mechanického parametru nedošlo. Podle [1] nelze na výslednou pevnost kompozitního systému vyztuženého krátkými vlákny zanedbat vliv konců těchto vláken, na kterých dochází k vysoké koncentraci napětí. V důsledku takové koncentrace napětí se jejich konce přednostně oddělují od matrice již při velmi nízkém zatížení. U konců vláken pak v matrici vznikají mikrotrhlinky. První mikrotrhlinka vytvořená na konci vlákna může způsobit i řadu dalších efektů. Mezipovrchová smyková napětí podél vláken mohou oddělit vlákna od matrice a trhlina se začne šířit podél vlákna. Stane-li se toto se všemi vlákny, vlákna se stávají zcela neúčinnými a kompozitní materiál se chová jako by byl tvořen pouze svazkem vláken. Vliv konců vláken tedy způsobuje snížení meze pevnosti v tahu krátkovláknových kompozitních systémů.

V literatuře [2] je popsán i další velký vliv ovlivňující výslednou pevnost — póry, které jsou v kompozitním systému téměř vždy přítomné. Póry nejen, že redukují účinný průřez přenášející zatížení, ale působí také jako koncentrátoři napětí vedoucí ke snížení meze pevnosti v tahu. Jak je zřejmé ze snímků SEM analýzy lomových ploch uvedené na straně 28 (odd. 2.4), podílely se póry na snížení meze pevnosti významně, jelikož představují zhruba 20 až 30 % účinného průřezu.

# Kapitola 4

## Závěr

Cílem práce byly povrchové úpravy studeným plazmatem, jako případná možnost ovlivnění mezifázového rozhraní mezi přírodními rostlinnými vlákny a polymerní maticí krátkovláknových vícesměrných kompozitních systémů.

Shrnutím dosažených výsledků, lze dospět k závěru, že se tato metoda ukázala jako neefektivní, jelikož výsledky nebyly uspokojivé, protože se nedostavilo očekávané zvýšení sledovaných mechanických parametrů. Důvodem se zdá být to, že nedošlo k dostatečné smáčivosti povrchu vyztužujících vláken polymerem, jak je patrné ze SEM analýzy lomových ploch uvedené na straně 28 (odd. 2.4). Jako jedna z příčin se nabízí přítomnost zbytkové vlhkosti.

Jak je však publikováno v práci [13], modifikací polymeru studeným plazmatem skutečně dochází ke zvýšení povrchové smáčivosti (např. mezi polymerem a kovem). Rovněž z článku [27], ale i dalších, které jsou zveřejněny na serveru ScienceDirect, bylo dokázáno, že úpravou přírodních vláken dochází k omezení jejich hydrofilního chování. Lze tedy předpokládat, že kdyby byl dokonalý kontakt mezi vyztužujícími vlákny a maticí a zároveň byla snížena navlhavost přírodních vláken, pravděpodobně by výsledky práce byly mnohem příznivější.

Na základě poznatků vlastních a uvedených v citované literatuře bych doporučoval modifikovat povrch materiálu matrice, ale i samotných vyztužujících vláken, čímž by se zlepšila smáčivost na straně polymeru použitého jako matrice kompozitního systému a zároveň odstranila problematická navlhavost přírodních vláken. S použitím těchto úprav lze předpokládat vyšší mechanickou pevnost z hlediska adheze mezi vláknennou výztuží a maticí než je publikováno v [27]. Uvedené doporučení by mohlo být předmětem dalšího výzkumu, který by tento předpoklad potvrdil.



# Literatura

- [1] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J.: *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 296 s.
- [2] BAREŠ, R. A.: *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 328 s.
- [3] BĚHÁLEK, L.: *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů: Přehled termoplastů a reaktoplastů*. Liberec: TUL, [2006]. Studijní materiál. <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf)>.
- [4] BĚHÁLEK, L.: *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů: Stanovení tahových vlastností polymerů*. Liberec: TUL, [2005?]. Studijní materiál. <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/laboratore/N/4bb.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/laboratore/N/4bb.pdf)>.
- [5] BĚHÁLEK, L.: *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů: Tahová zkouška plastů*. Liberec: TUL, [2004?]. Studijní materiál. <[http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/p7/tah1.pdf](http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p7/tah1.pdf)>.
- [6] BLEDZKI, A. K., GASSAN, J.: Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress In Polymer Science*. May 1999, vol. 24, iss. 2, p. 221–274. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TX2-3WHCDH3-2-36&\\_cdi=5578&\\_user=640831&\\_orig=browse&coverDate=05/31/1999&\\_sk=999759997&view=c&wchp=dGLbVlb-zSkzS&md5=8b47fdfeff39c24d1adfe3b64afb00c0&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TX2-3WHCDH3-2-36&_cdi=5578&_user=640831&_orig=browse&coverDate=05/31/1999&_sk=999759997&view=c&wchp=dGLbVlb-zSkzS&md5=8b47fdfeff39c24d1adfe3b64afb00c0&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [7] CARRINO, L., MORONI, G., POLINI, W.: Cold plasma treatment of polypropylene surface: a study on wettability and adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*. February 2002, vol. 121, iss. 2–3, p. 373–382. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=)

- B6TGJ-44SKDX3-4-25&\_cdi=5256&\_user=640831&\_orig=search&\_coverDate=02/28/2002&\_sk=998789997&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzk&md5=7b178500d730a9033b18c85718aeafce&ie=/sdarticle.pdf>.
- [8] CHAND, N., DWIVEDI, K. U., ACHARYA, K. S.: Anisotropic abrasive wear behaviour of bamboo. *Wear*. April 2007, vol. 262, iss. 9–10, p. 1031–1037. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6V5B-4MCWMB4-1-9&\\_cdi=5782&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=04/10/2007&\\_sk=997379990&view=c&wchp=dGLbVtb-zSkzk&md5=d35e7da50c44560e8fa0fef115ad278f&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V5B-4MCWMB4-1-9&_cdi=5782&_user=640831&_orig=search&_coverDate=04/10/2007&_sk=997379990&view=c&wchp=dGLbVtb-zSkzk&md5=d35e7da50c44560e8fa0fef115ad278f&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [9] CHANDRA, R., RUSTGI, R.: Biodegradable polymer. *Progress in Polymer Science*. November 1998, vol. 23, iss. 7, p. 1273–1335. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TX2-3V51F22-4-T&\\_cdi=5578&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=11/30/1998&\\_sk=999769992&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzS&md5=fd45ff80ef962ac28d206c59becffd3c&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TX2-3V51F22-4-T&_cdi=5578&_user=640831&_orig=search&_coverDate=11/30/1998&_sk=999769992&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzS&md5=fd45ff80ef962ac28d206c59becffd3c&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [10] DHAKAL, N. H., ZHANG, Y. Z., RICHARDSON, O. W. M.: Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*. June 2007, vol. 67, iss. 7–8, p. 1674–1683. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TWT-4KWK17P-1-1&\\_cdi=5571&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=06/30/2007&\\_sk=999329992&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzS&md5=ca0a04b92218072fa9f694ae062dcc3f&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TWT-4KWK17P-1-1&_cdi=5571&_user=640831&_orig=search&_coverDate=06/30/2007&_sk=999329992&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzS&md5=ca0a04b92218072fa9f694ae062dcc3f&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [11] DRZAL, L. T., MOHANTY, A. K., BURGUEÑO, R., MISRA, M.: Biobased Structural Composite Materials for Housing and Infrastructure Applications: Opportunities and Challenges. *NSF-PATH Housing Research Agenda Workshop*. [s.l.]: [s.n.], [2004]. P. 129–140. <<http://www.pathnet.org/si.asp?id=1076>>.
- [12] GHAVAMI, K.: Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*. July 2005, vol. 27, iss. 6, p. 637–649. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TWF-4FJGW4K-1-16&\\_cdi=5561&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TWF-4FJGW4K-1-16&_cdi=5561&_user=640831&_orig=search&_)

coverDate=07/31/2005&\_sk=999729993&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkWW&md5=e59d3409fa55649c9fe0720fbb96039b&ie=/sdarticle.pdf>.

- [13] HLADÍK, J.: *Aplikace plazmových technologií pro úpravy a zušlechťování povrchů práškových hmot*. Liberec, 2007. 112 s. Doktorská práce na Strojní fakultě Technické univerzity v Liberci na katedře materiálu. Vedoucí doktorské práce prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc. ISBN 987-80-7372-166-4.
- [14] HULL, D., CLYNE, T.W.: *An Introduction to Composite Materials*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 342 p. ISBN 0-521-38855-4.
- [15] ISMAIL, H., EDYHAM, R.M., WIRJOSENTONO, B.: Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent. *Polymer Testing*. December 2002, vol.21, iss.2, p.139-144. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MIimg&\\_imagekey=B6TXX-44KM0F5-6-15&\\_cdi=5602&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=12/31/2002&\\_sk=999789997&view=c&wchp=dGLbVlz-zSkWW&md5=3a57078a5af0ce2f87a0a034e4d6b05b&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TXX-44KM0F5-6-15&_cdi=5602&_user=640831&_orig=search&_coverDate=12/31/2002&_sk=999789997&view=c&wchp=dGLbVlz-zSkWW&md5=3a57078a5af0ce2f87a0a034e4d6b05b&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [16] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2005. 170 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [17] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů: Zpracování plastů*. 1. vyd. Liberec: VŠST, 1991. 250 s. ISBN 80-7083-074-3.
- [18] KREBS, J., SOVA, J.: *Termoplasty v praxi: Praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů*. Svazek 1 5. vyd. Praha: Verlag Dashöfer, 2000. ISBN 80-86229-15-7.
- [19] LENFELD, P.: *Technologie II: Zpracování plastů. Část 2* 1. vyd. Liberec: TUL, 2006. 139 s. ISBN 80-7372-037-X.
- [20] MILITKÝ, J.: *Přednášky — Textilní vlákna; Speciální vlákna*. 1. vyd. Liberec: TUL, 2005. 423 s. ISBN 80-7083-892-2.
- [21] SKOČOVSKÝ, P., ŠIMAN, I.: *Štruktúrna analýza liatin*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1989. 256 s. ISBN 80-05-00092-8.

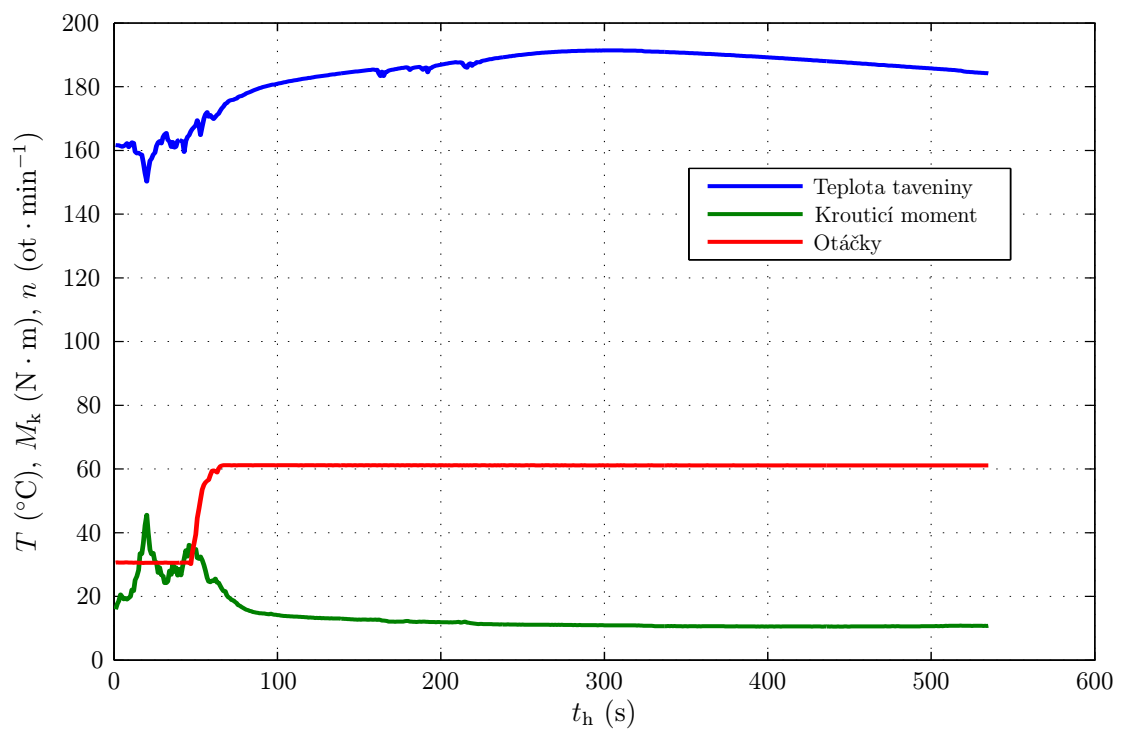
- [22] STACH, V.: *Úvod do problematiky plazmatu*. 1. vyd. České Budějovice: Pedagogická fakulta v Českých Budějovicích, 1987. 80 s.
- [23] STANĚK, J.; HYNČICOVÁ, J.; KOVAČIČ, V.: *Nauka o textilních materiálech*. 1. vyd. Liberec: VŠST, 1986. 212 s.
- [24] SULOVSÝ, P.: *Minerály v ovzduší*. Brno: Masarykova univerzita, [2002?]. Prezentace. <[http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Envi\\_mineralogie/Envi\\_miner2.pdf](http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Envi_mineralogie/Envi_miner2.pdf)>.
- [25] WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I.: Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*. July 2003, vol. 63, iss. 9, p. 1 259–1 264. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TWT-48KVBD9-7-M&\\_cdi=5571&\\_user=640831&\\_orig=browse&\\_coverDate=07/31/2003&\\_sk=999369990&view=c&wchp=dGLbVlz-zSkWb&md5=b30c8552ff68fb3d44423bb1b35c6fe6&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TWT-48KVBD9-7-M&_cdi=5571&_user=640831&_orig=browse&_coverDate=07/31/2003&_sk=999369990&view=c&wchp=dGLbVlz-zSkWb&md5=b30c8552ff68fb3d44423bb1b35c6fe6&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [26] YAO, W., LI, Z.: Flexural behavior of bamboo-fiber-reinforced mortar laminates. *Cement and Concrete Research*. January 2003, vol. 33, iss. 1, p. 15–19. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TWG-4698PNX-1-9&\\_cdi=5562&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=01/31/2003&\\_sk=999669998&view=c&wchp=dGLbVtb-zSkzS&md5=f79ad1df4d4d77e330bebdebfa9044dc&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TWG-4698PNX-1-9&_cdi=5562&_user=640831&_orig=search&_coverDate=01/31/2003&_sk=999669998&view=c&wchp=dGLbVtb-zSkzS&md5=f79ad1df4d4d77e330bebdebfa9044dc&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [27] YUAN, X., JAYARAMAN, K., BHATTACHARYYA, D.: Effects of plasma treatment in enhancing the performance of woodfibre-polypropylene composites. *Applied Science and Manufacturing*. December 2004, vol. 35, iss. 12, p. 1 363–1 374. <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TWN-4CYGS3M-3-W&\\_cdi=5567&\\_user=640831&\\_orig=search&\\_coverDate=12/01/2004&\\_sk=999649987&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzk&md5=20c8a615fcf9129d42331a8890079311&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TWN-4CYGS3M-3-W&_cdi=5567&_user=640831&_orig=search&_coverDate=12/01/2004&_sk=999649987&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzk&md5=20c8a615fcf9129d42331a8890079311&ie=/sdarticle.pdf)>.
- [28] *ČSN EN ISO 527-1: Plasty — Stanovení tahových vlastností — Část 1: Základní principy*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [29] *ČSN EN ISO 527-2: Plasty — Stanovení tahových vlastností — Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

- [30] *Invitation to the SEM World*. Tokyo: JEOL Serving Advanced Technology, 1996. 50 p. <<http://www.jeolusa.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?EntryId=257&PortalId=2&DownloadMethod=attachment>>.
- [31] *Len a konopí: Situační a výhledová zpráva*. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR, 2003. 40 s. ISBN 80-7084-252-0. <[http://81.0.228.70/attachments/LEN\\_06\\_03.pdf](http://81.0.228.70/attachments/LEN_06_03.pdf)>.
- [32] *Stone Circle: Industrial Hemp*. December 3, 2003, vol. 5, iss. 5. Prague: Prague Post Endowment Fund, 2003. <<http://www.praguepost.cz/PPEF/05SC031203.pdf>>.
- [33] *Rozdělení přírodních vláken* [online]. [2004], Poslední úprava 12. října 2004 [cit. 2006-06-10]. <[http://www.omcentrum.cz/cesky/nove/prirodni\\_vlakna.htm](http://www.omcentrum.cz/cesky/nove/prirodni_vlakna.htm)>.

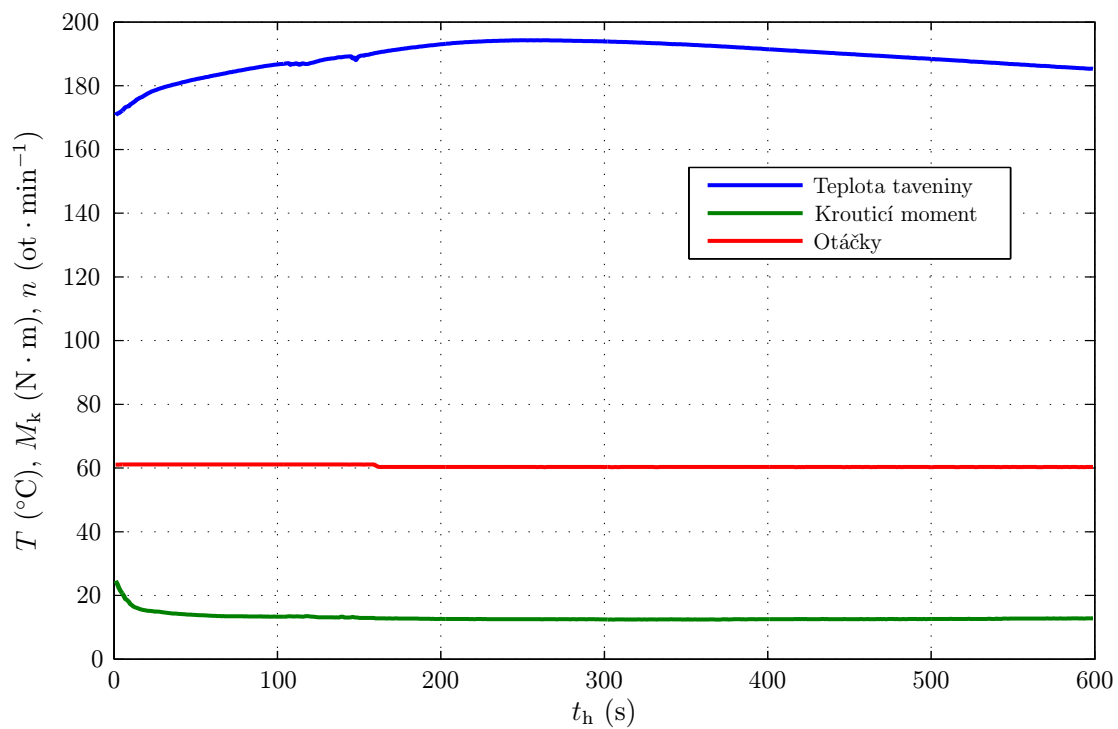
# Příloha A

## Homogenizace výztuže s matricí

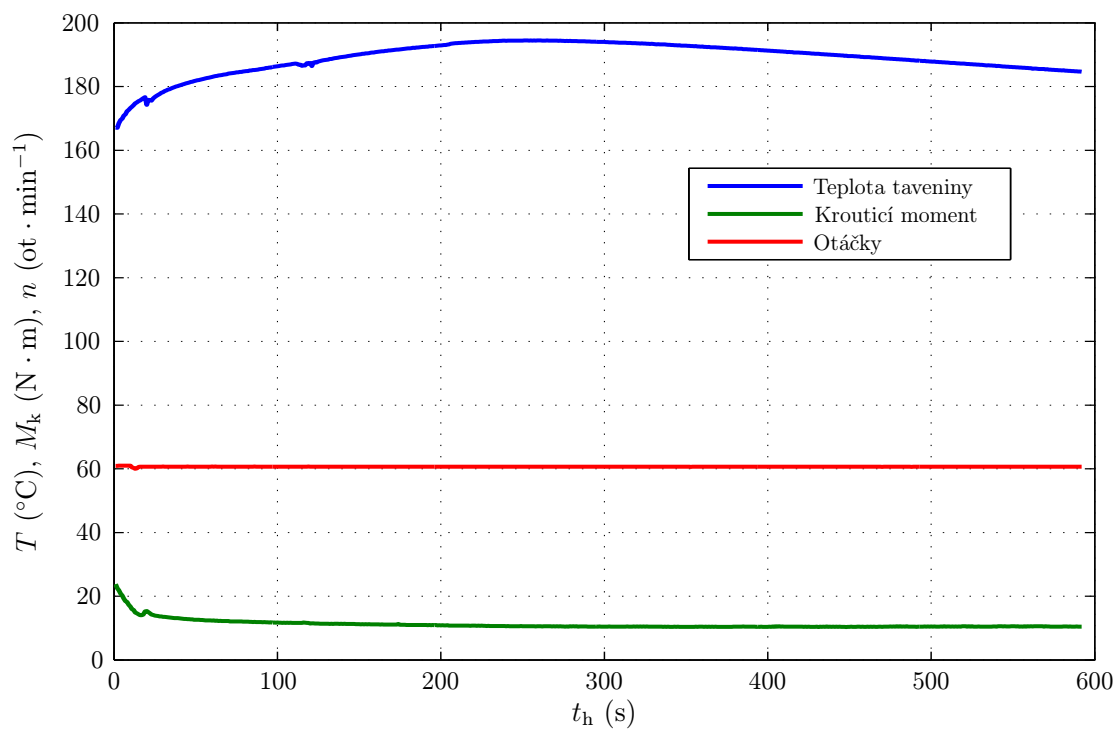
Následující grafy zobrazují pro jednotlivé kompozitní systémy průběhy teploty, kroutícího momentu na hřídeli šneku a otáček šneku během procesu homogenizace práškového polymeru s vyztužujícími vlákny.



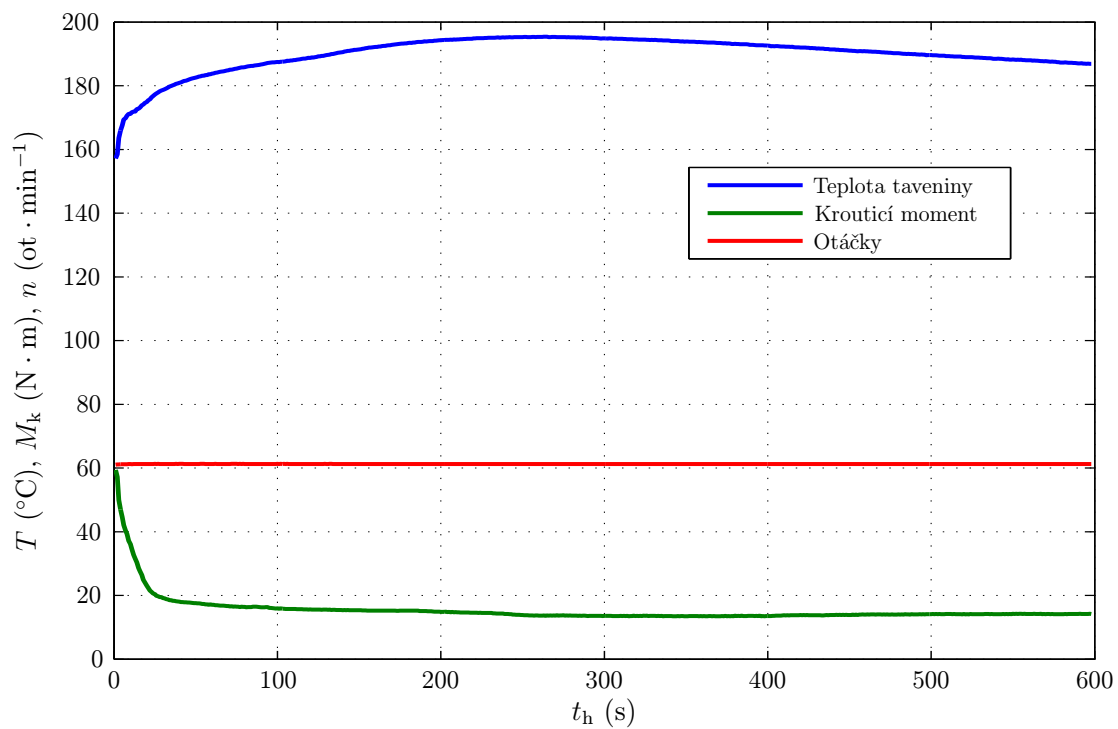
Obr. A.1: Homogenizace nemodifikované matrice



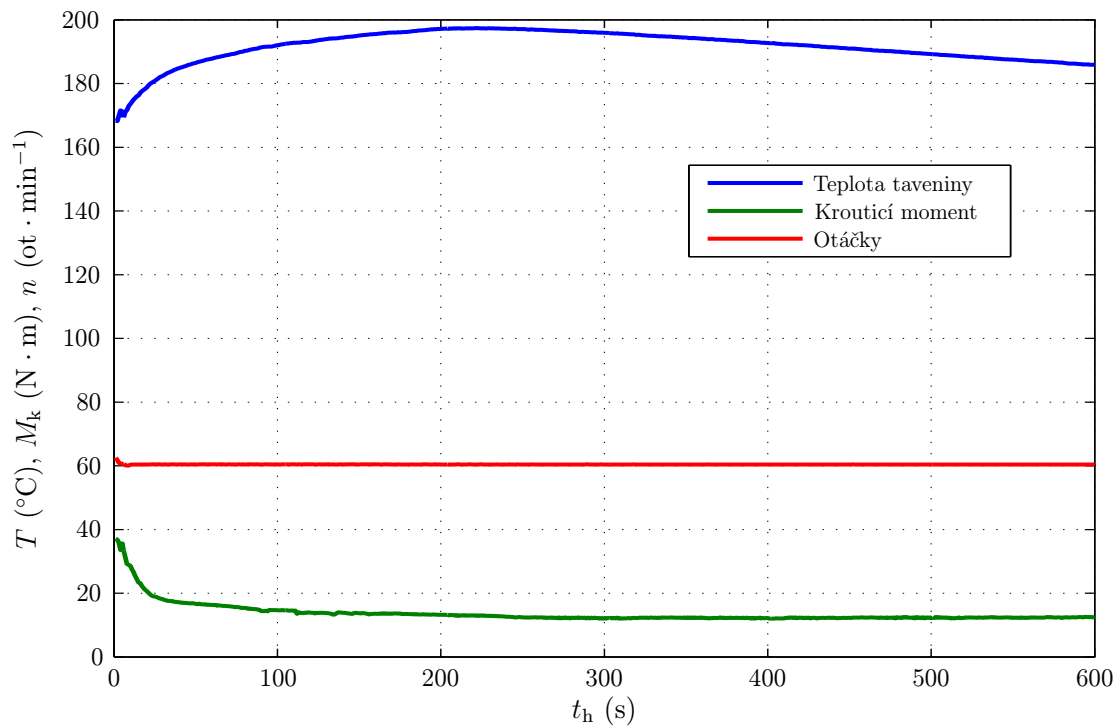
Obr. A.2: Homogenizace nemodifikované matrice + 9% bambusu



Obr. A.3: Homogenizace nemodifikované matrice + 9% konopí

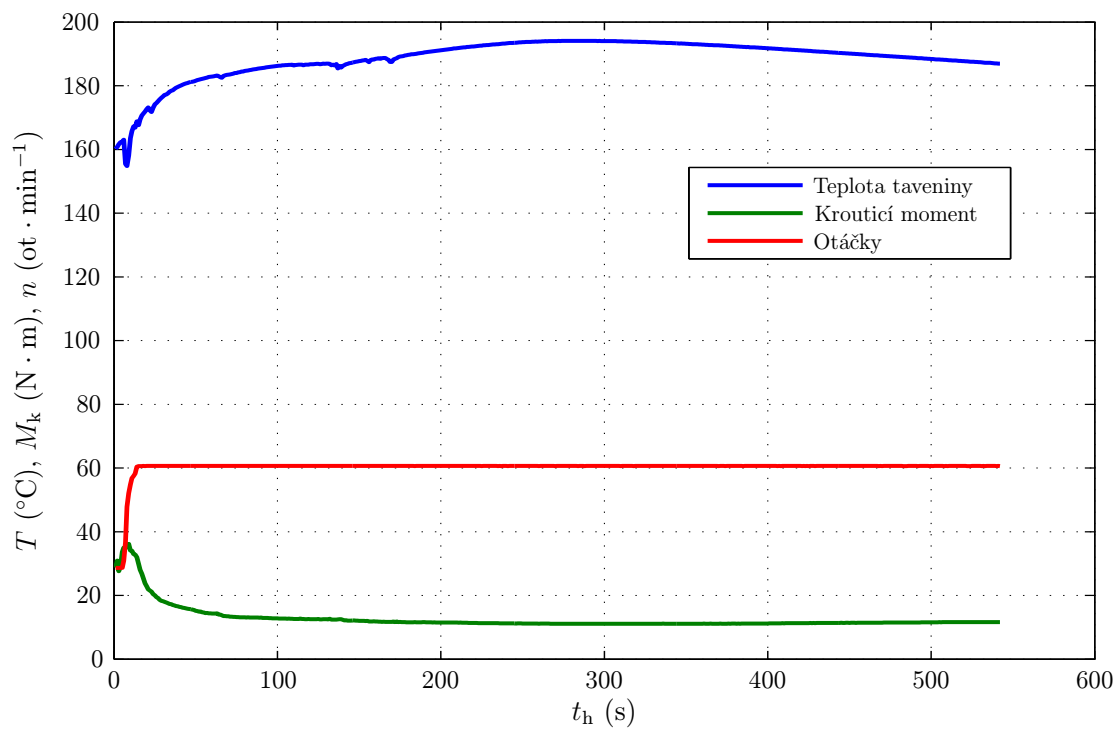


Obr. A.4: Homogenizace nemodifikované matrice + 30 % bambusu

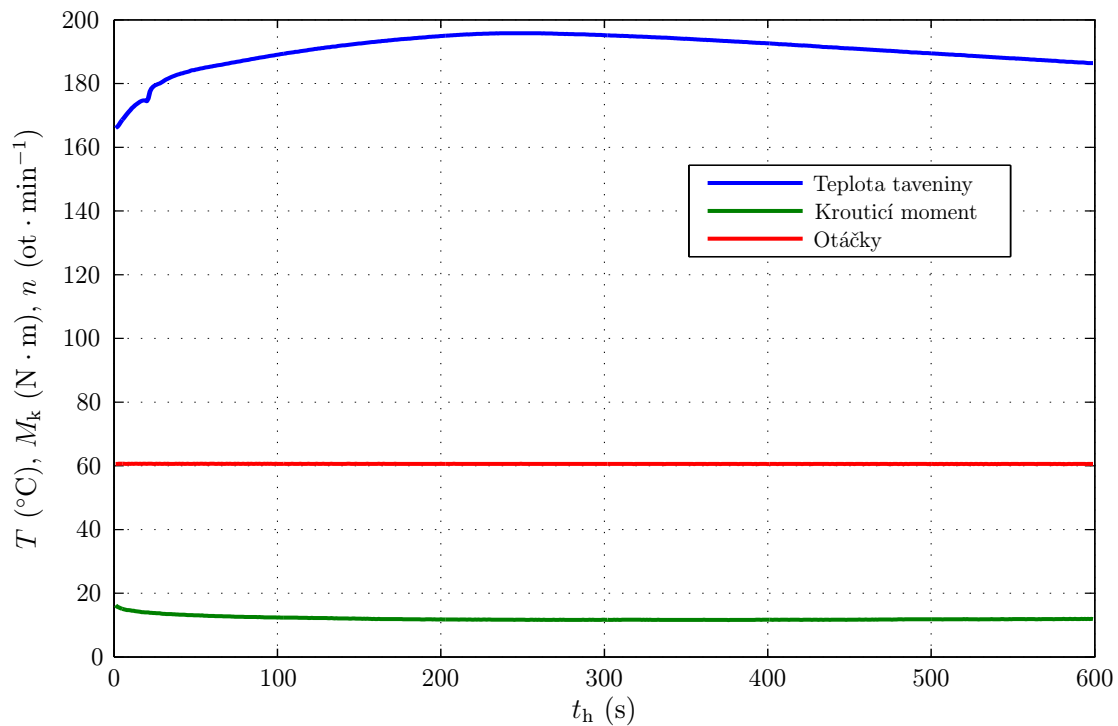


Obr. A.5: Homogenizace nemodifikované matrice + 30 % konopí

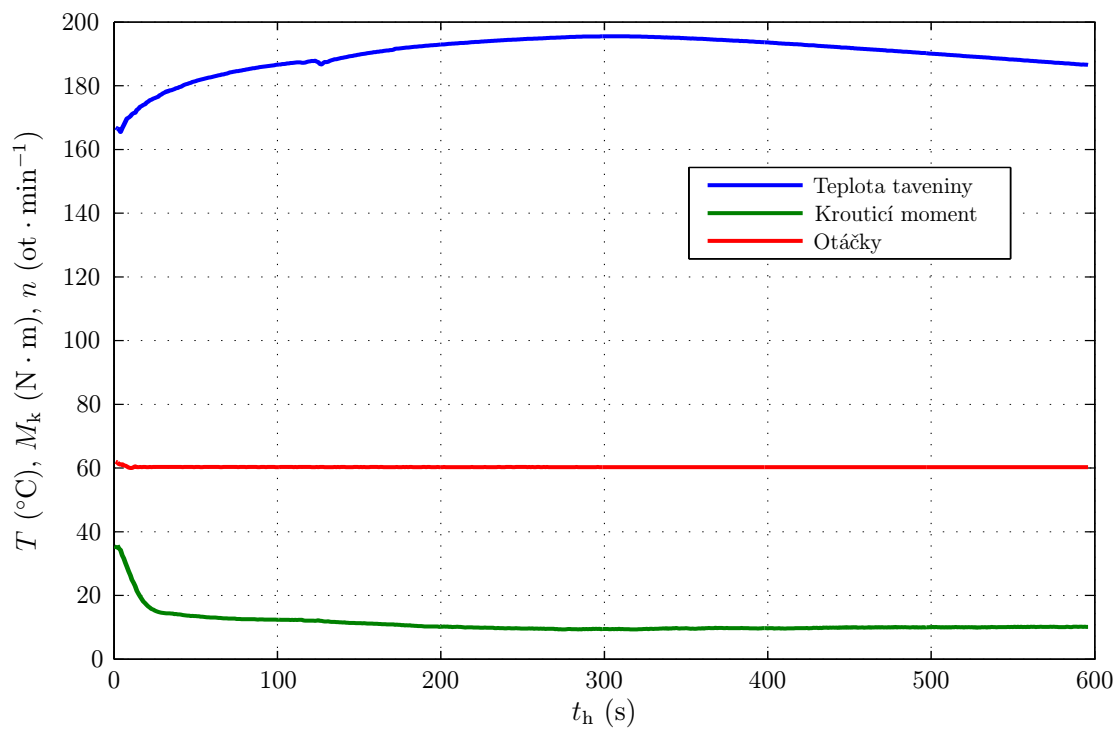




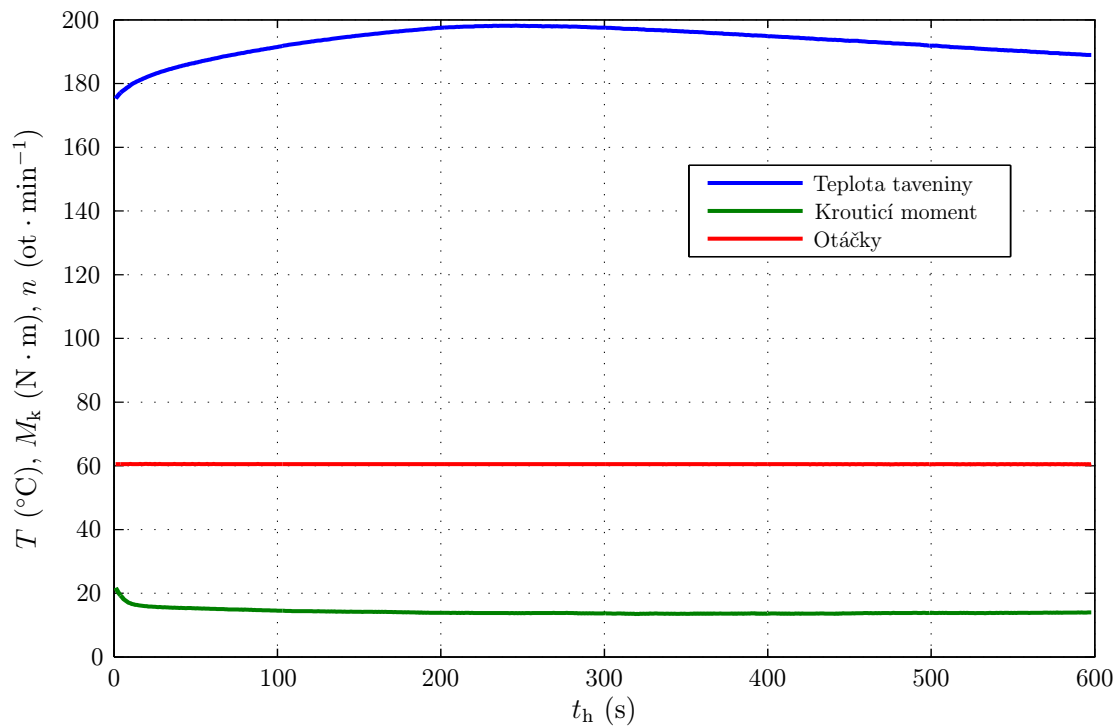
Obr. A.6: Homogenizace matrice modifikované kyslíkovým plazmatem



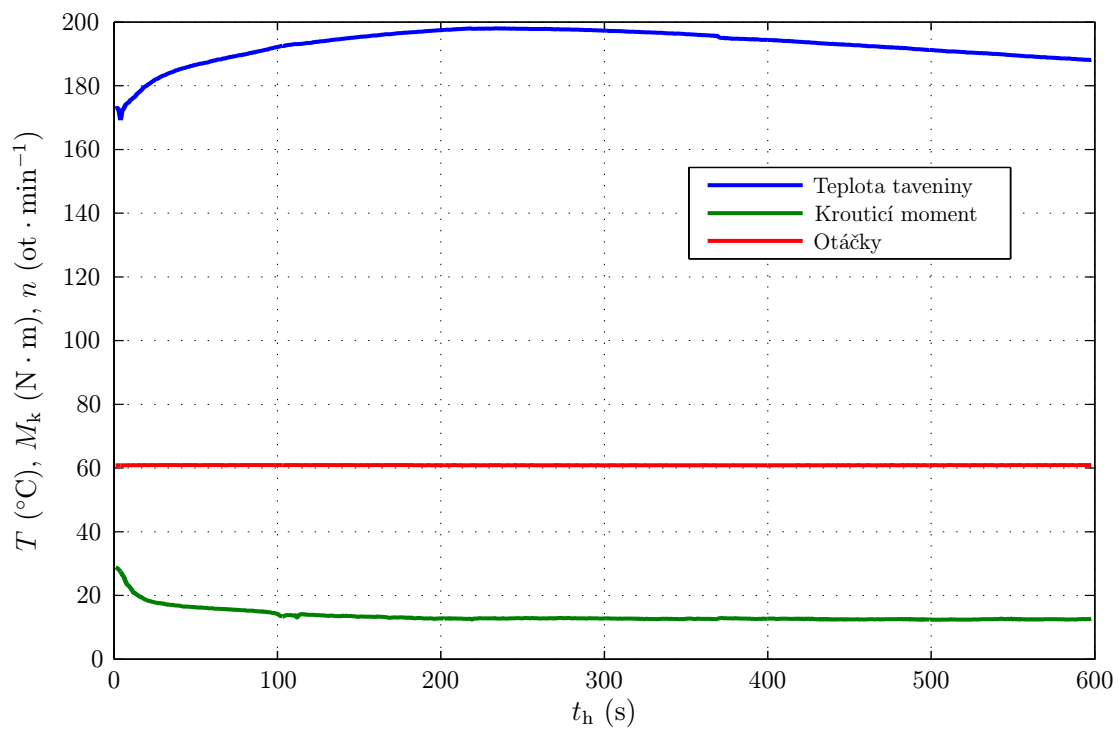
Obr. A.7: Homogenizace matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 9% bambusu



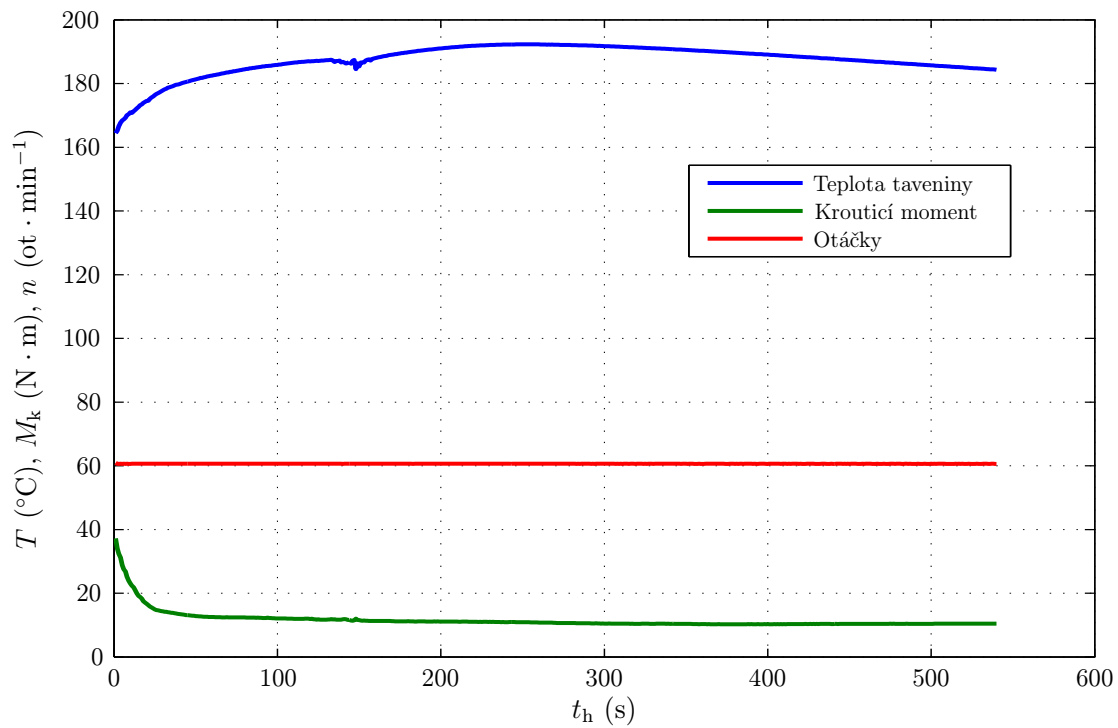
Obr. A.8: Homogenizace matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 9 % konopí



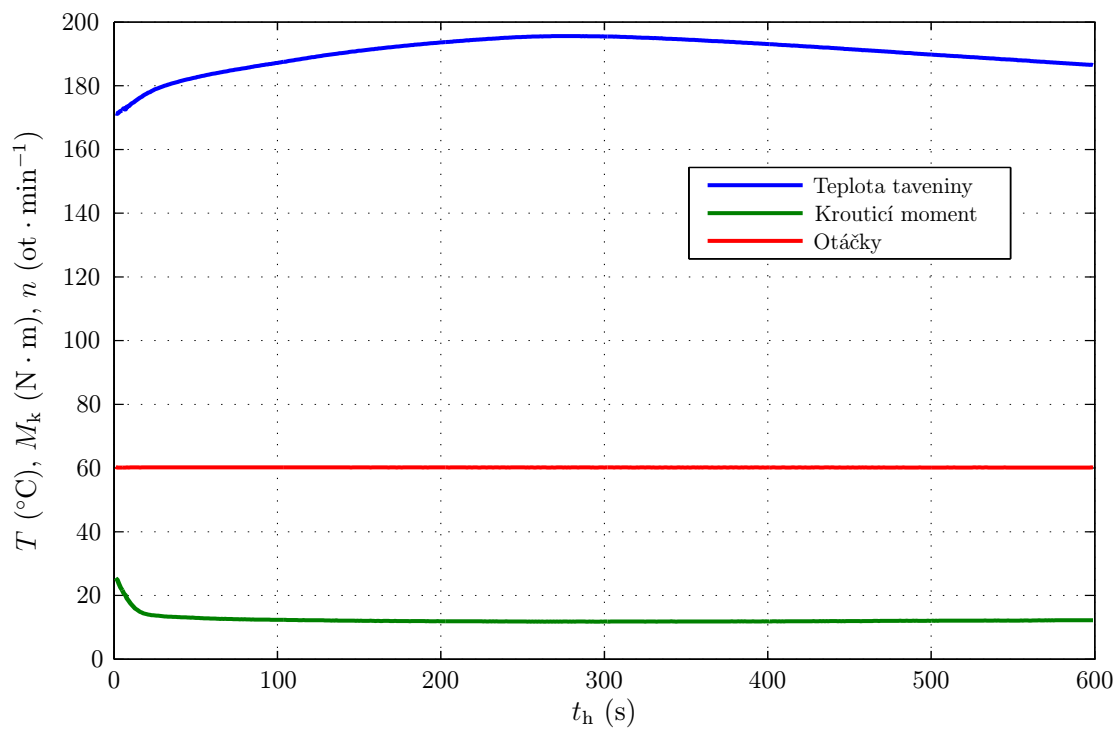
Obr. A.9: Homogenizace matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 30 % bambusu



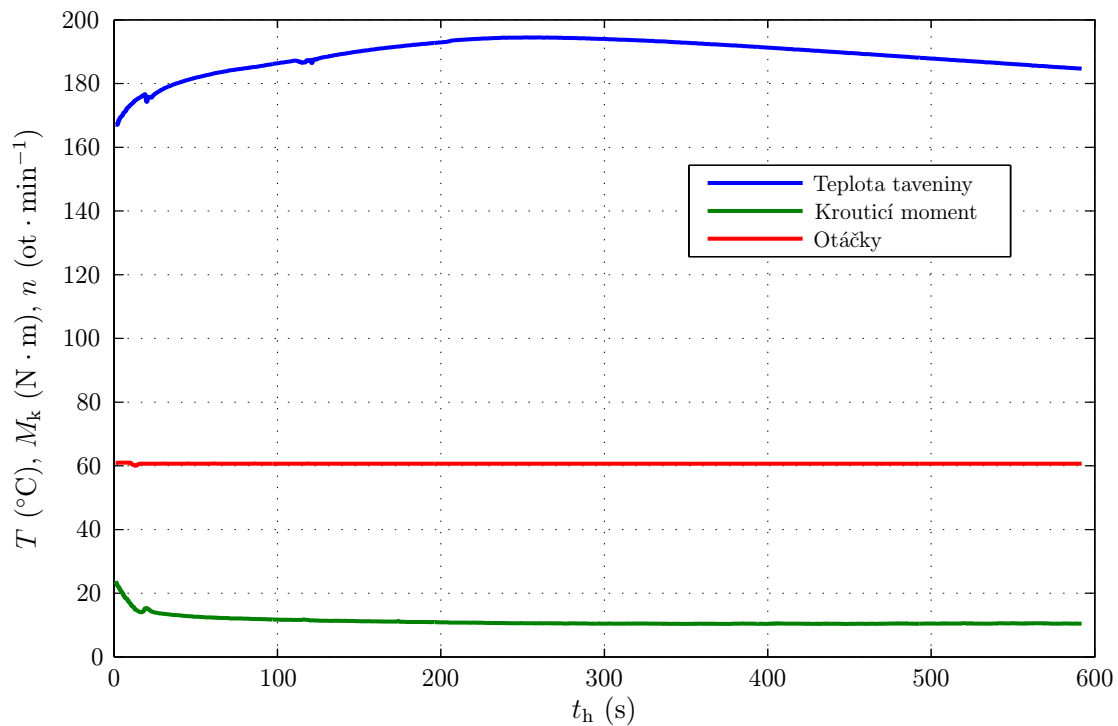
Obr. A.10: Homogenizace matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 30 % konopí



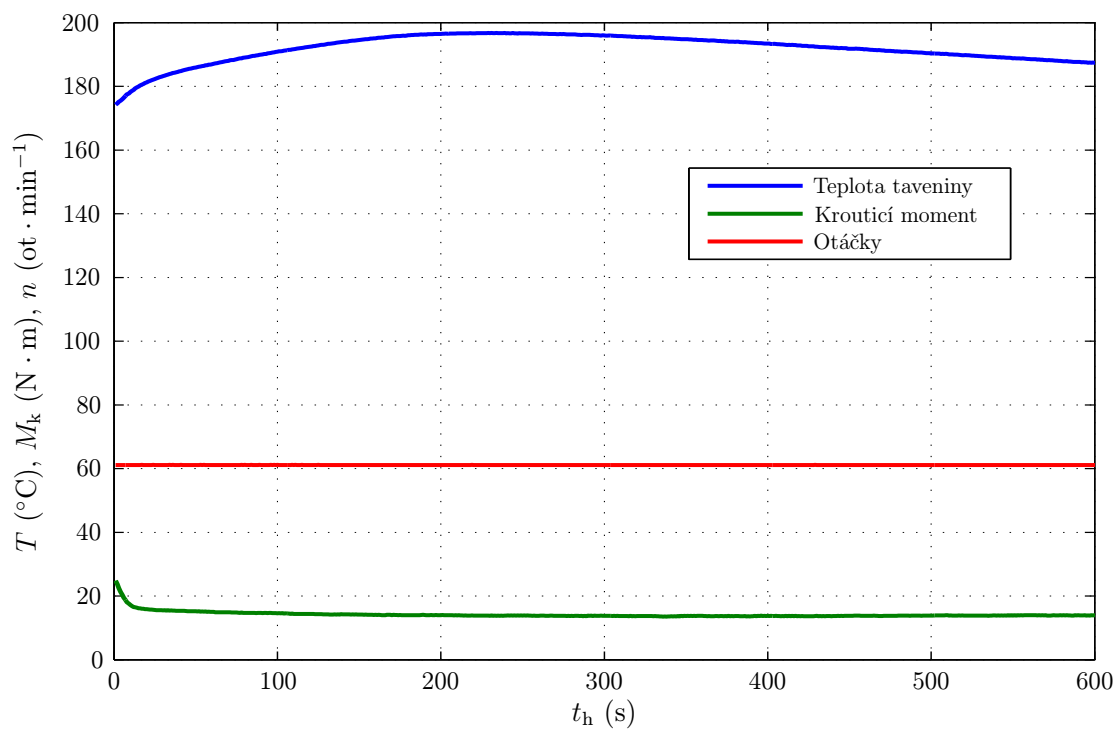
Obr. A.11: Homogenizace matrice modifikované vzduchovým plazmatem



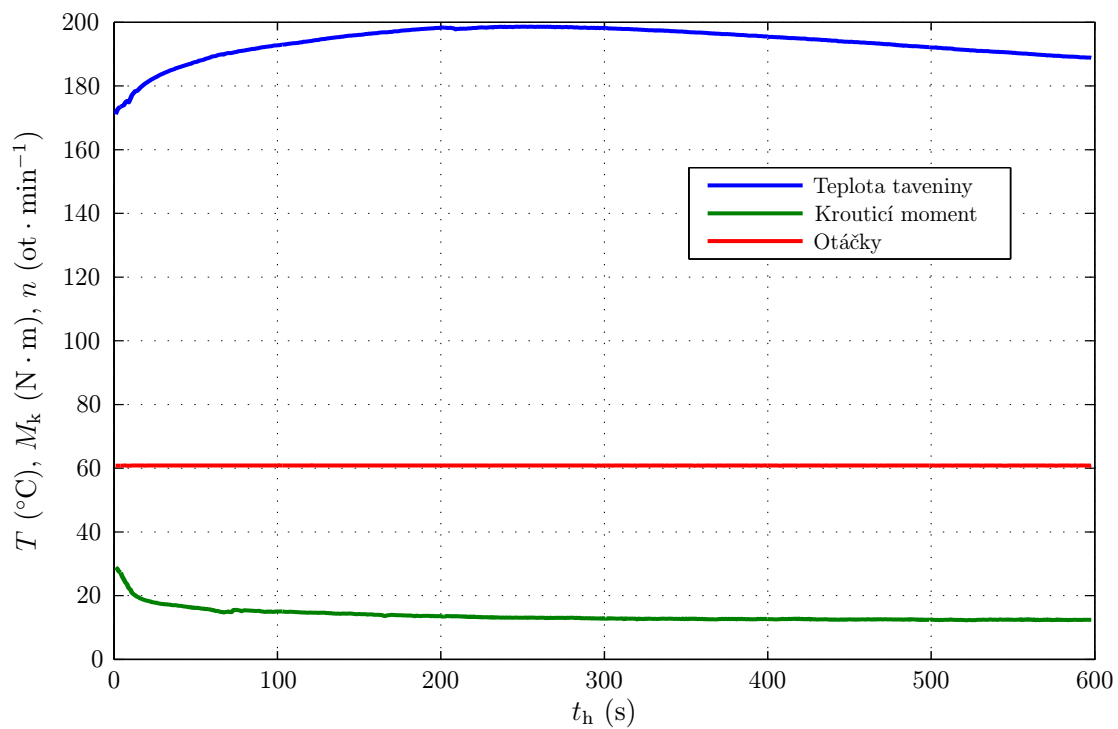
Obr. A.12: Homogenizace matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 9 % bambusu



Obr. A.13: Homogenizace matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 9 % konopí



Obr. A.14: Homogenizace matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 30% bambusu



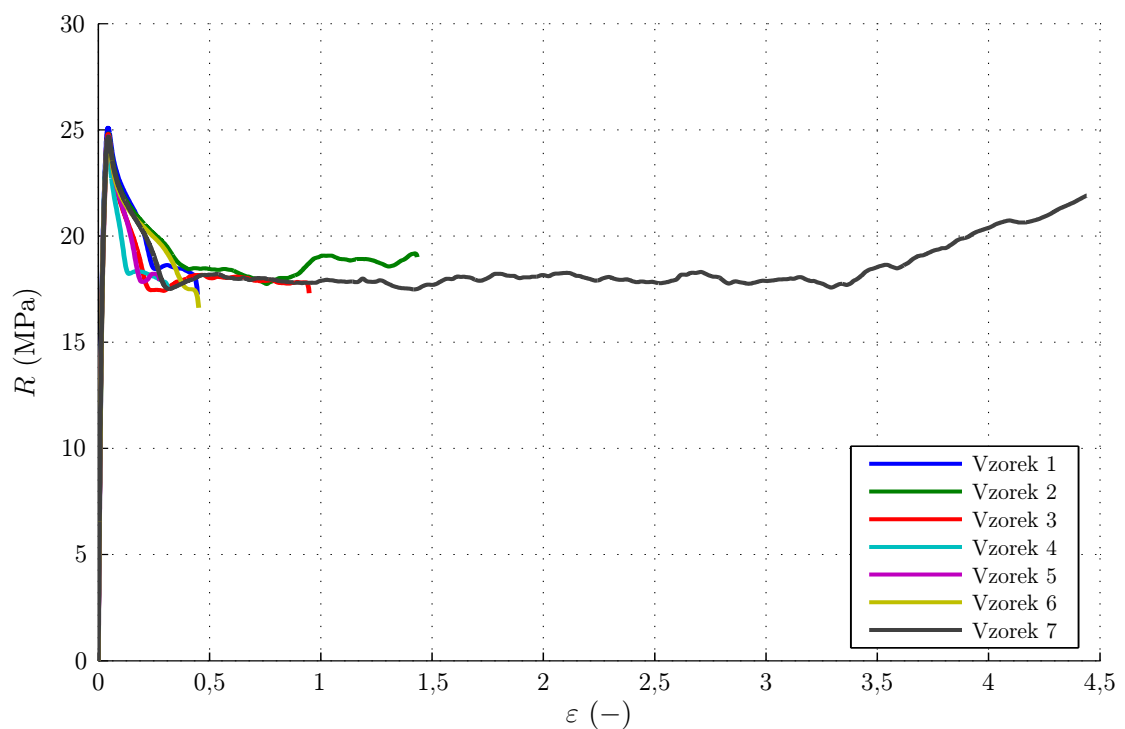
Obr. A.15: Homogenizace matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 30% konopí

# Příloha B

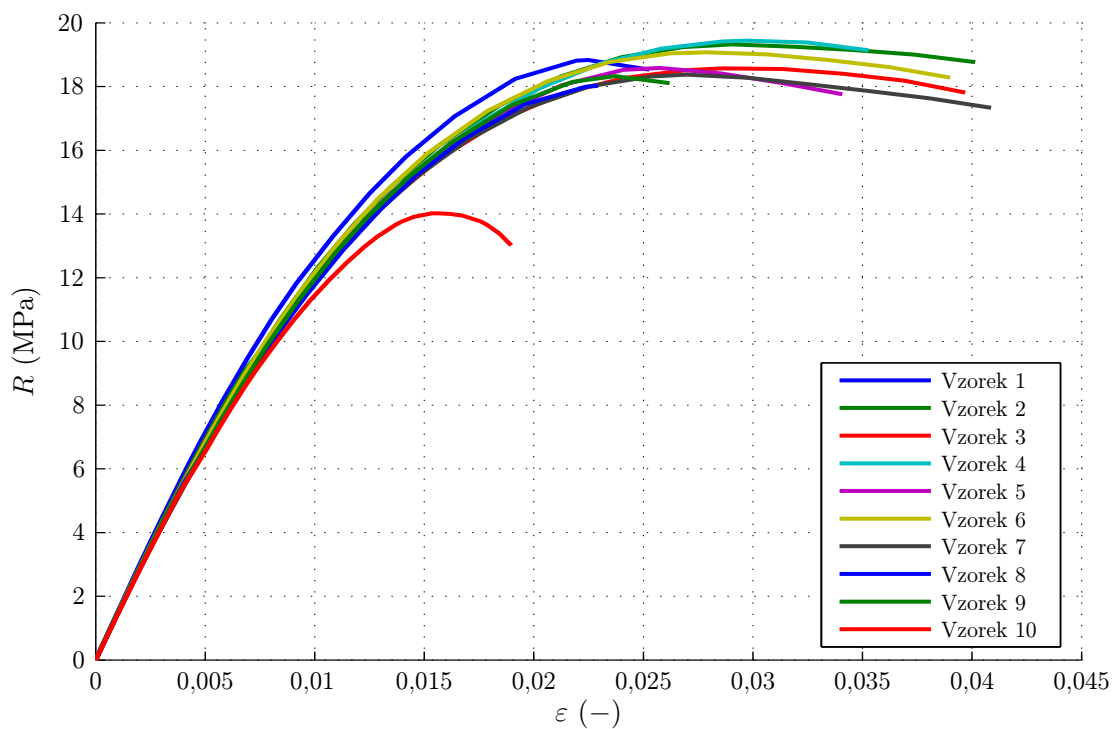
## Tahové křivky

Pro stanovení tahových vlastností bylo použito 10 zkušebních tělesek; s výjimkou čistého PP (obr. B.1), kde byly 3 vzorky použity pro seřízení zkušebního stroje a PPK (obr. B.6), kde byl 1 vzorek vyřazen z důvodu algoritmu zpracování dat.

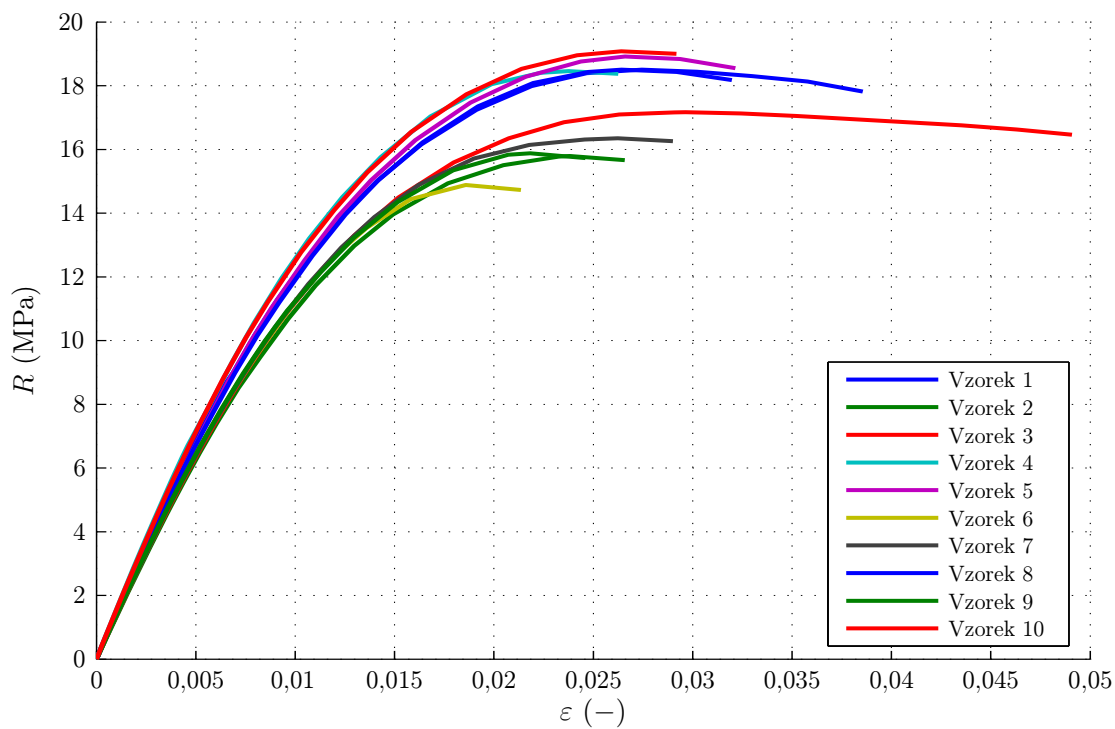
Následující grafy zobrazují tahové křivky zkoušených vzorků, ze kterých byly následně stanoveny vybrané mechanické parametry, jako jejich průměrné hodnoty.



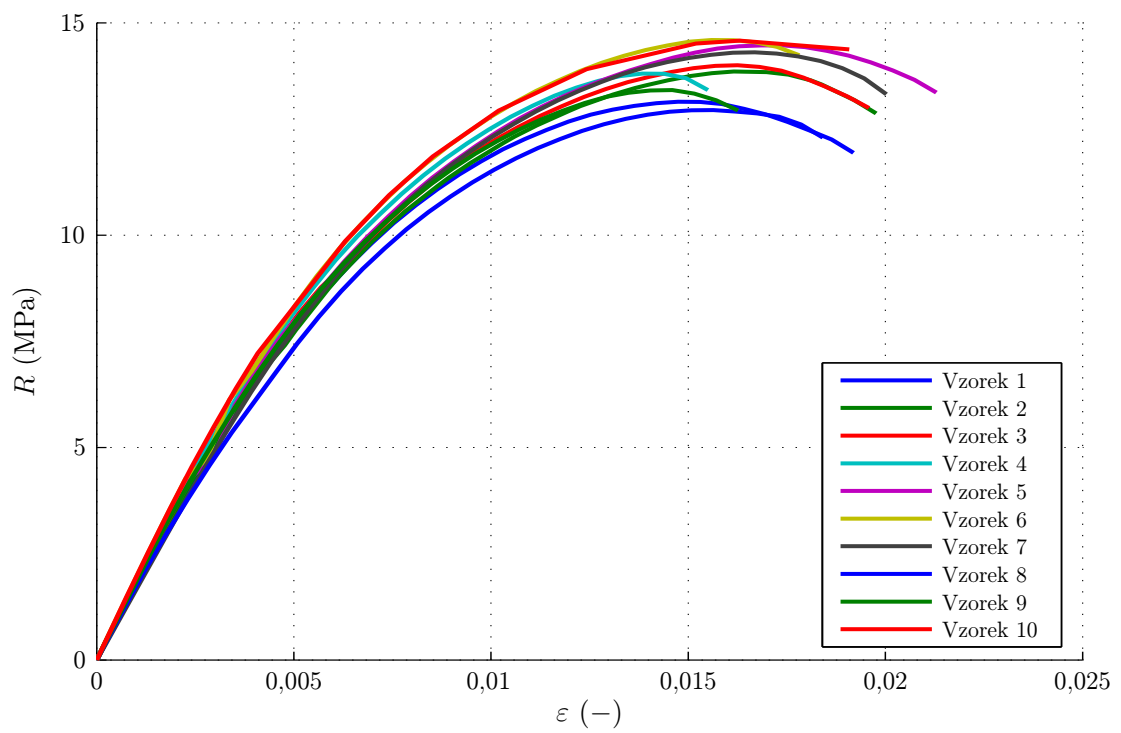
Obr. B.1: Tahová křivka nemodifikované matrice



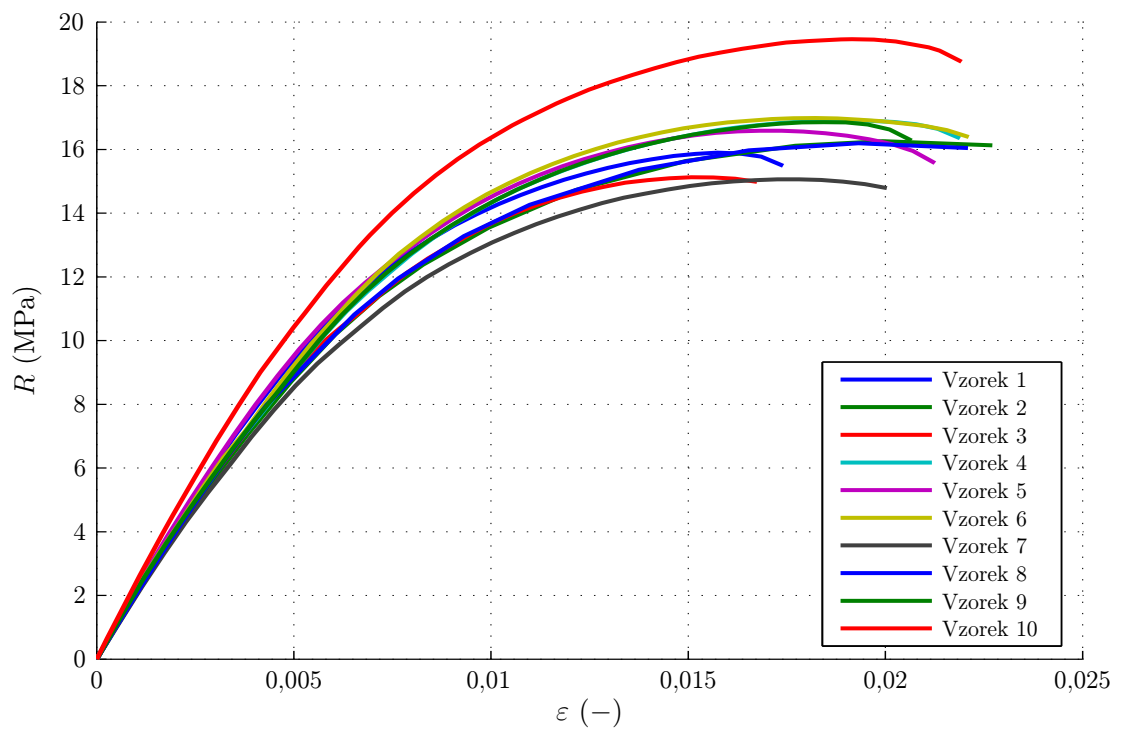
Obr. B.2: Tahová křivka nemodifikované matrice + 9% bambusu



Obr. B.3: Tahová křivka nemodifikované matrice + 9% konopí

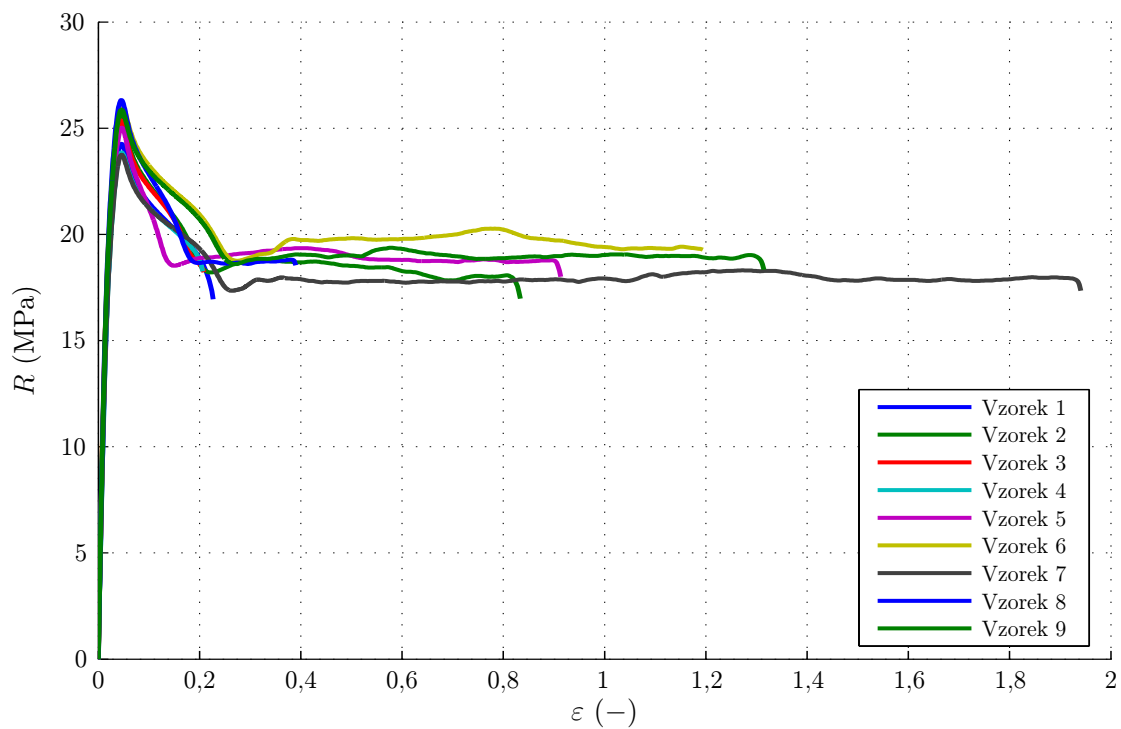


Obr. B.4: Tahová křivka nemodifikované matrice + 30 % bambusu

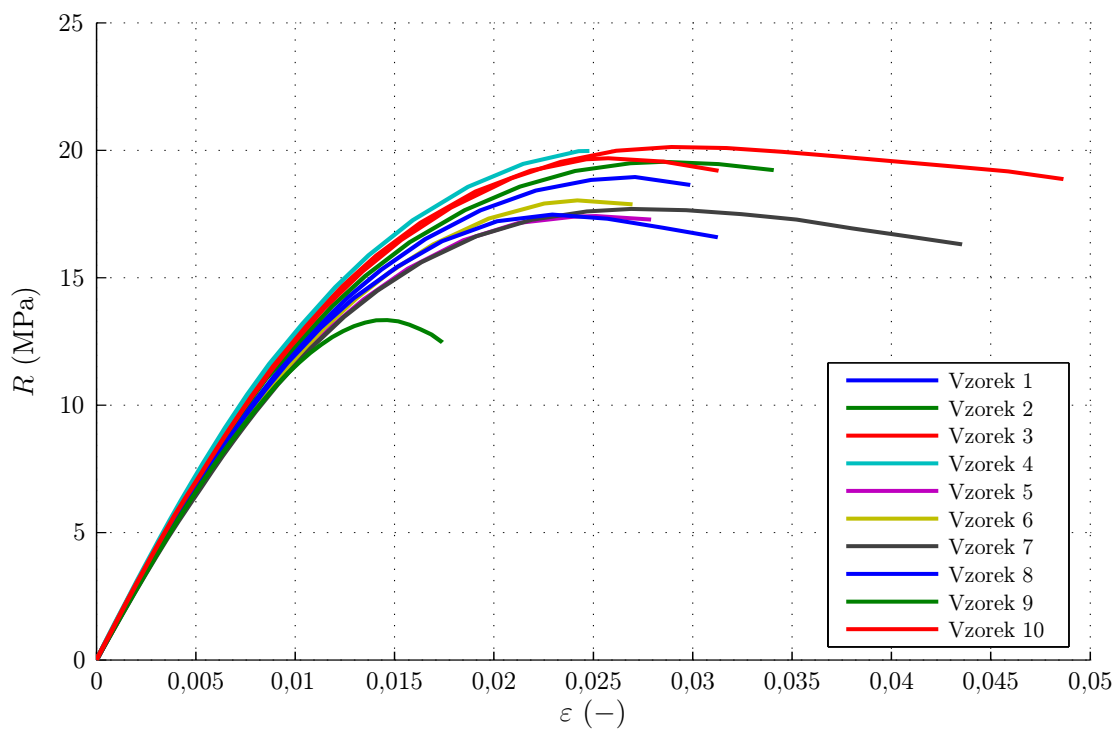


Obr. B.5: Tahová křivka nemodifikované matrice + 30 % konopí

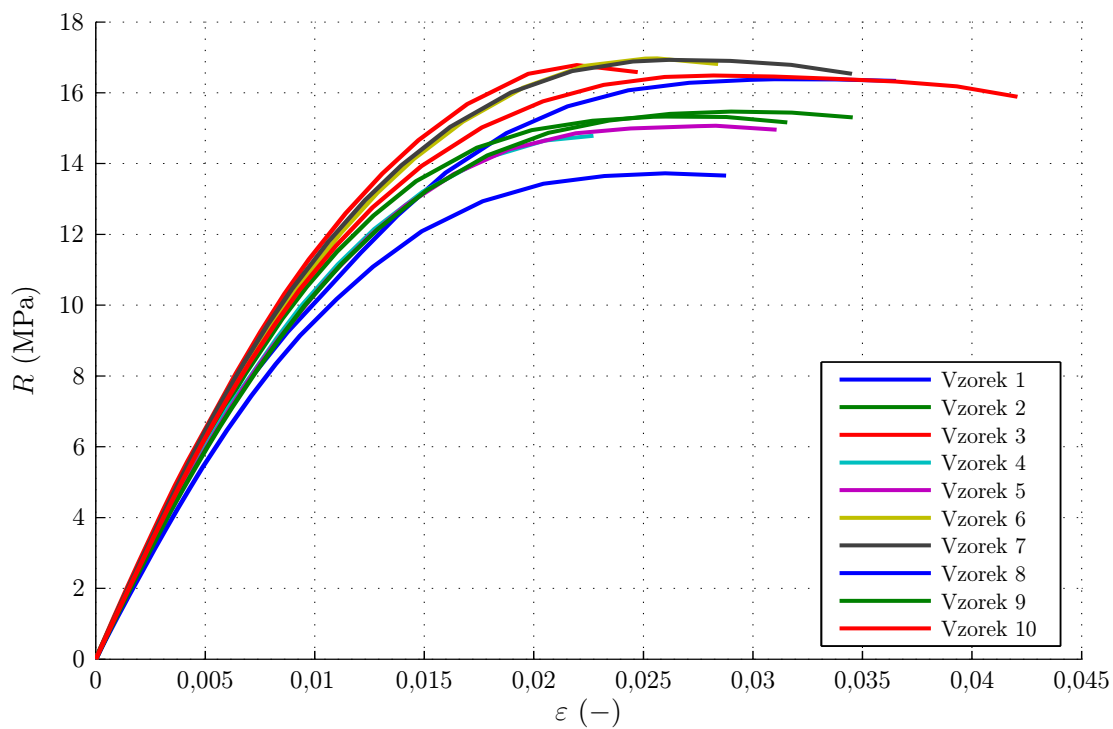




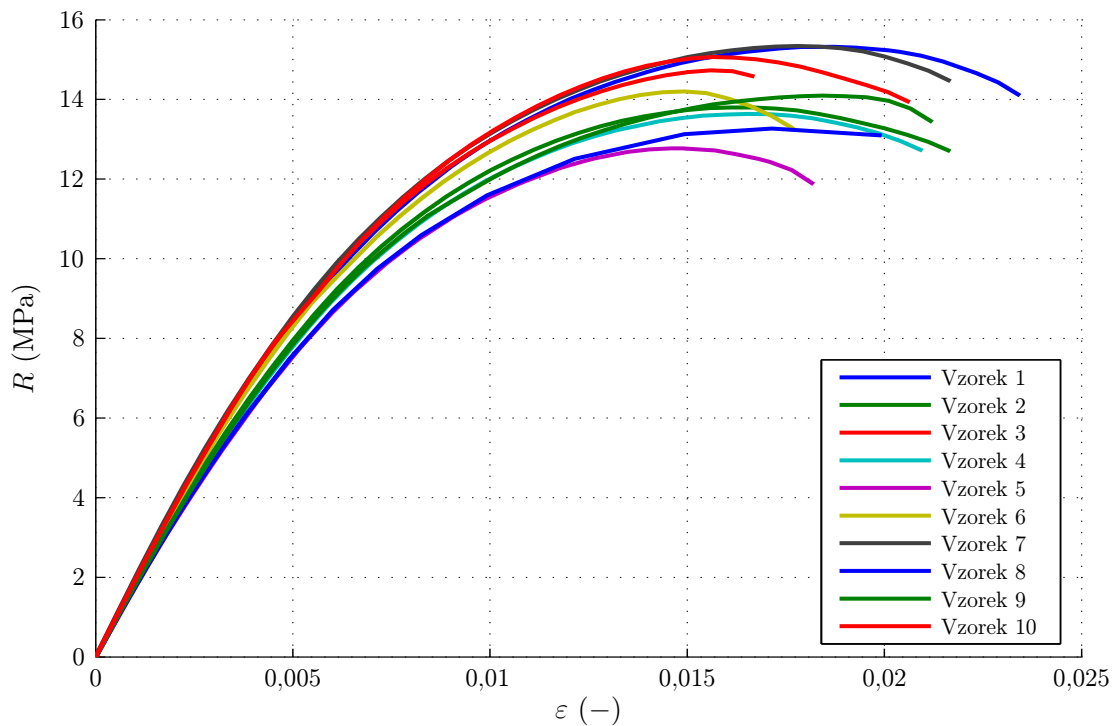
Obr. B.6: Tahová křivka matrice modifikované kyslíkovým plazmatem



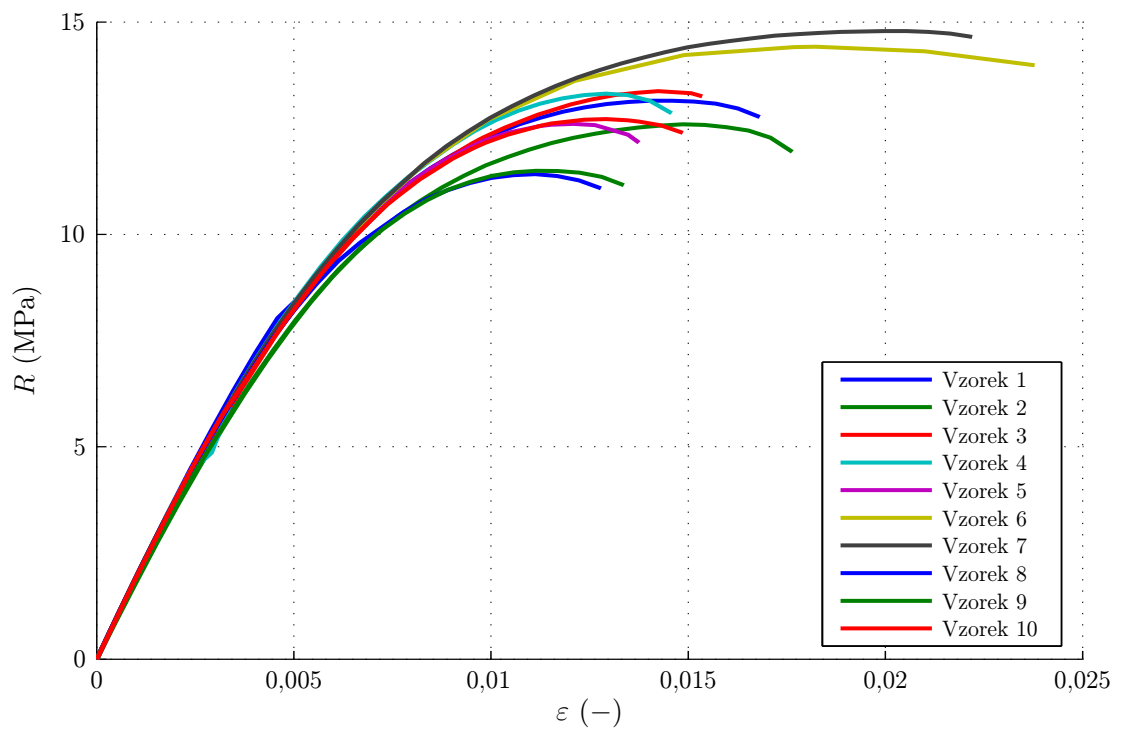
Obr. B.7: Tahová křivka matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 9% bambusu



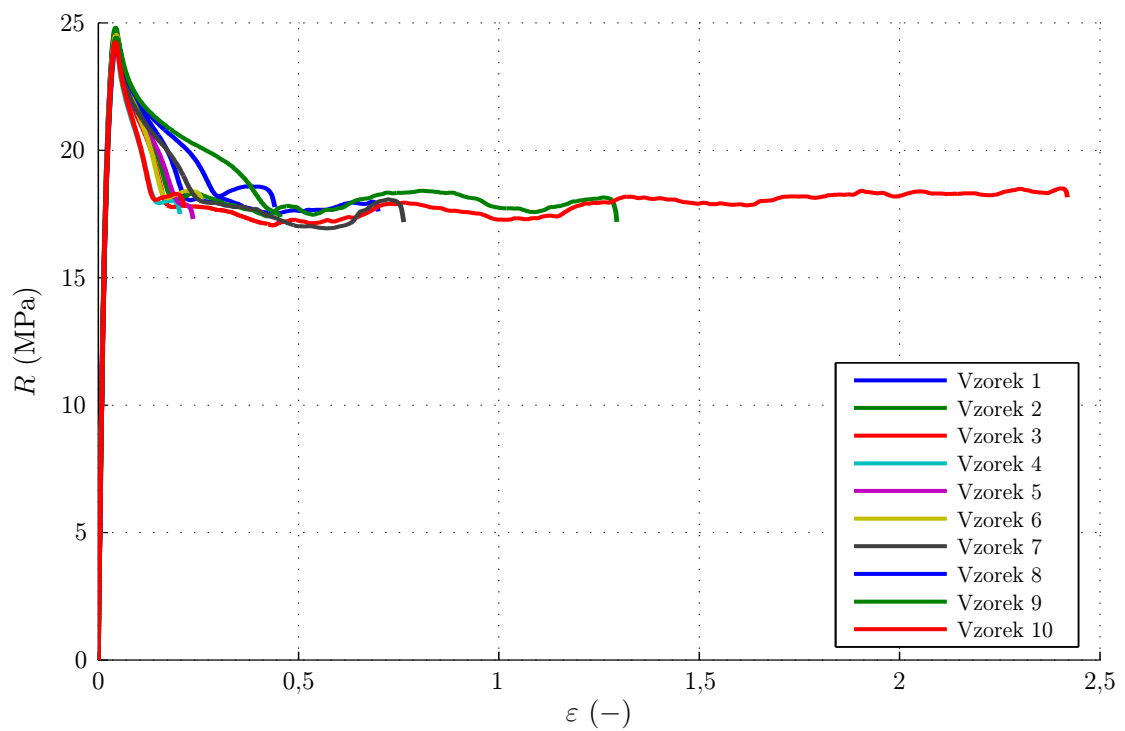
Obr. B.8: Tahová křivka matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 9 % konopí



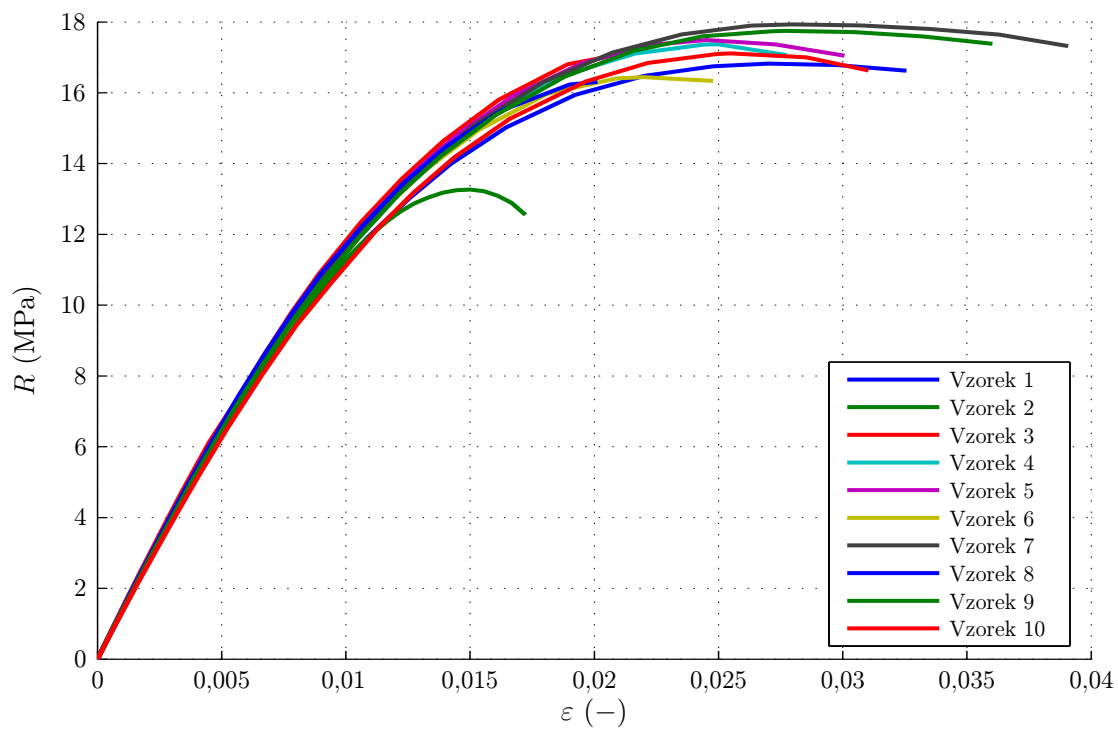
Obr. B.9: Tahová křivka matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 30 % bambusu



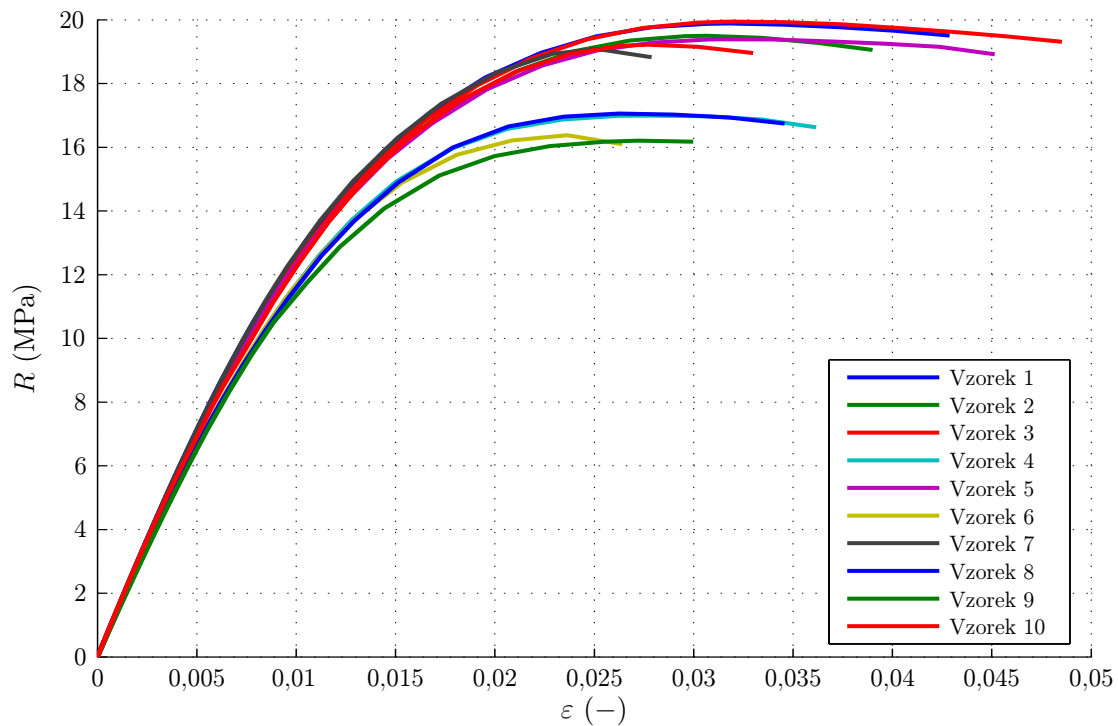
Obr. B.10: Tahová křivka matrice modifikované kyslíkovým plazmatem + 30 % konopí



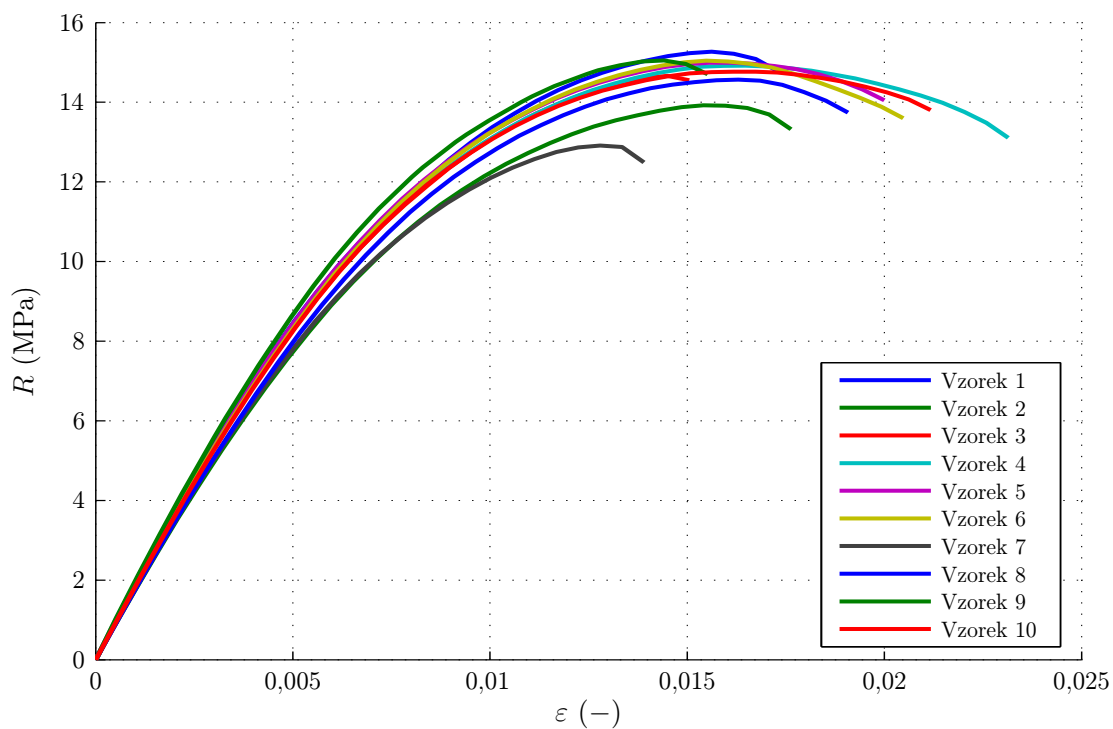
Obr. B.11: Tahová křivka matrice modifikované vzduchovým plazmatem



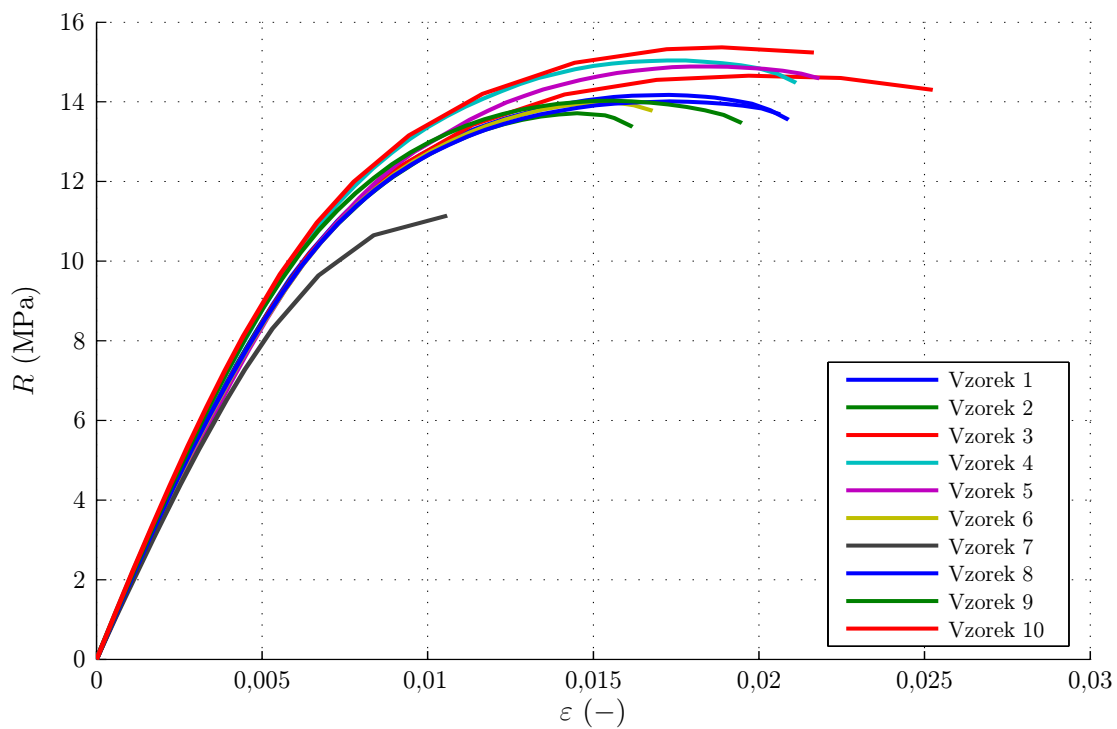
Obr. B.12: Tahová křivka matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 9% bambusu



Obr. B.13: Tahová křivka matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 9% konopí



Obr. B.14: Tahová křivka matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 30 % bambusu



Obr. B.15: Tahová křivka matrice modifikované vzduchovým plazmatem + 30 % konopí

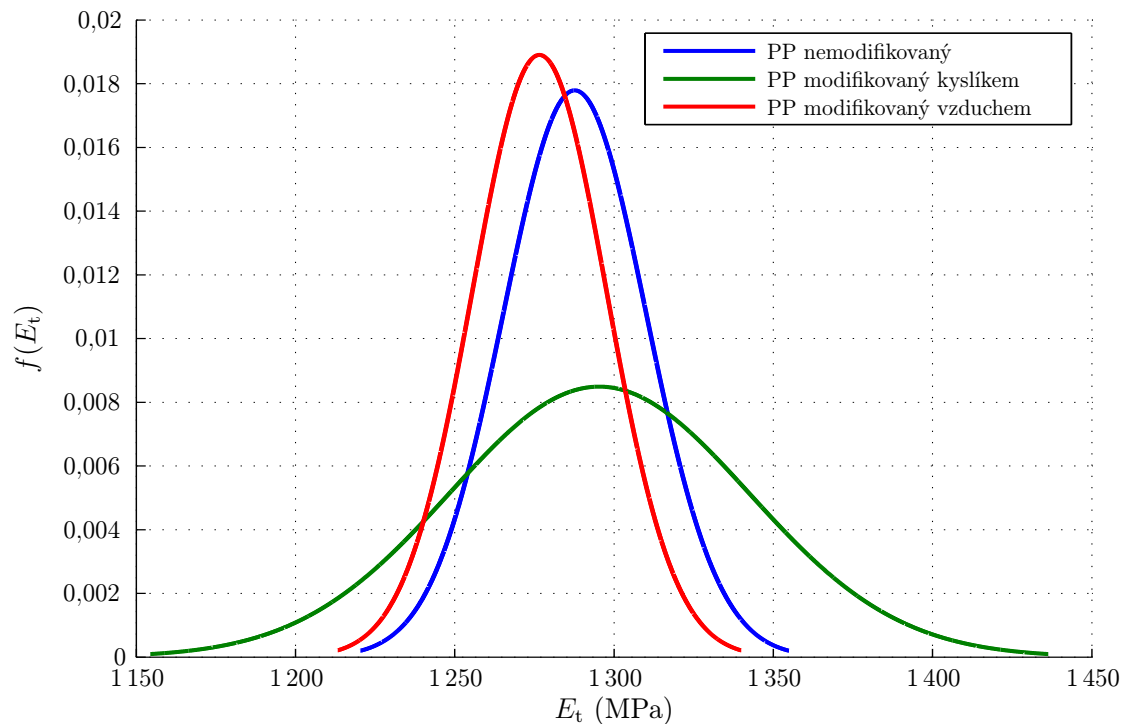
# Příloha C

## Gaussovy křivky

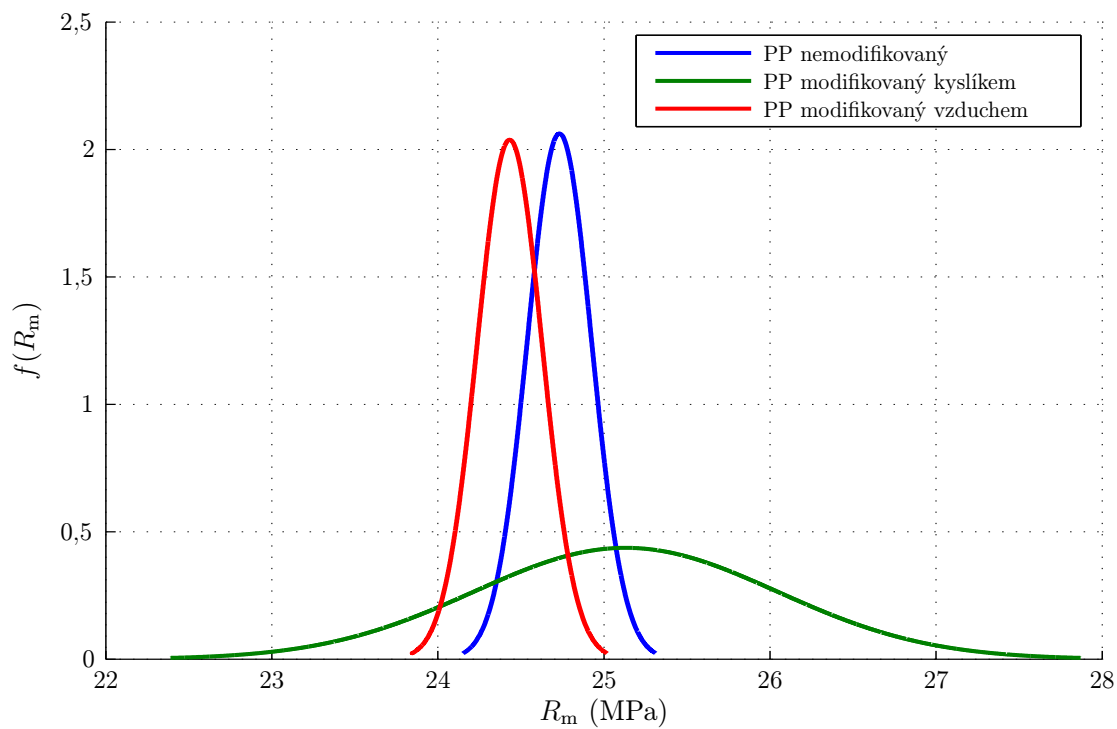
Normální Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti s parametry  $\mu$  a  $\sigma^2$  má hustotu pravděpodobnosti definovanou vztahem

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right].$$

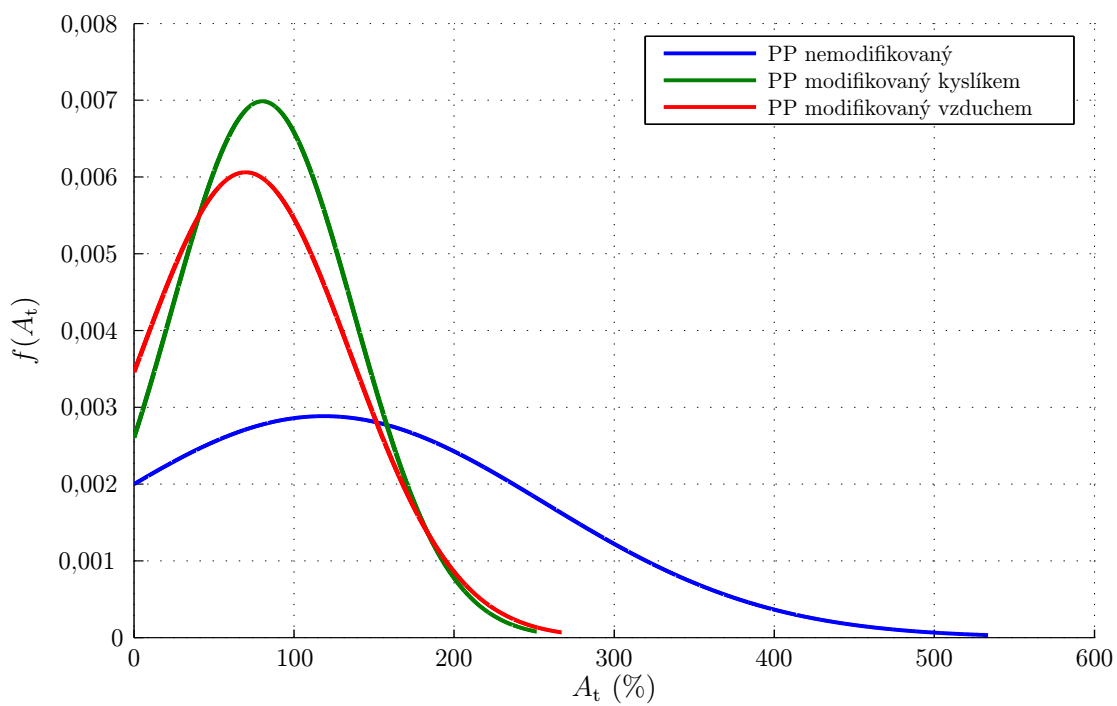
Následující grafy zobrazují Gaussovy křivky sledovaných mechanických vlastností.



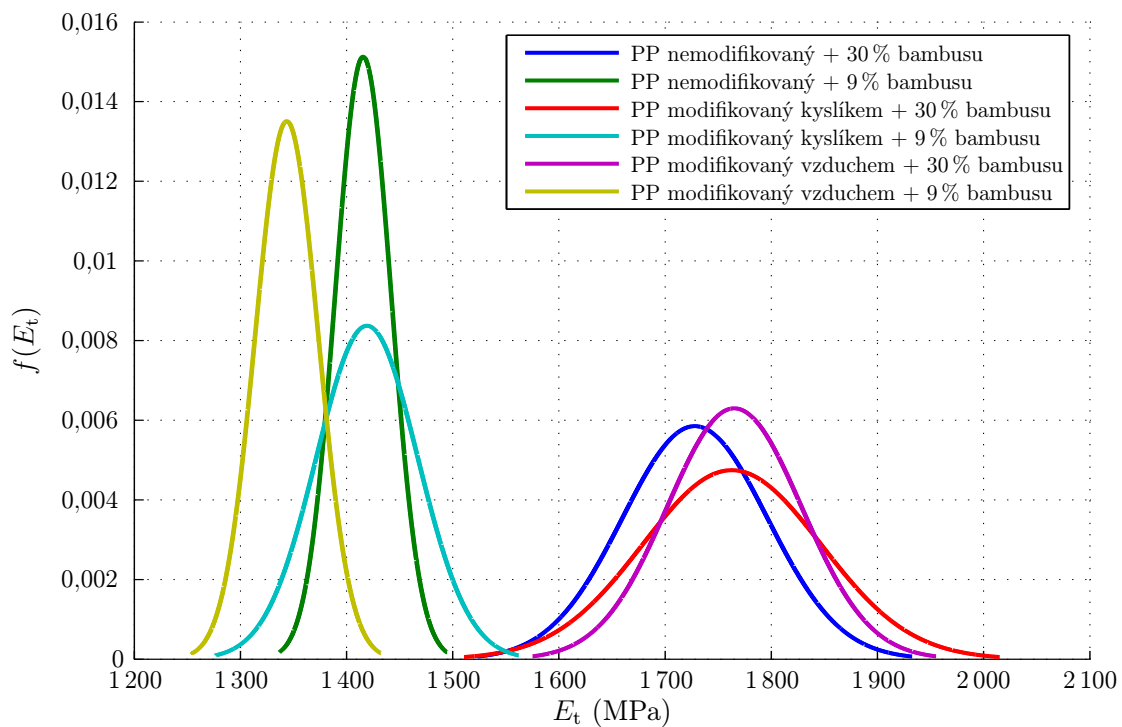
Obr. C.1: Gaussova křivka modulu pružnosti v tahu matrice



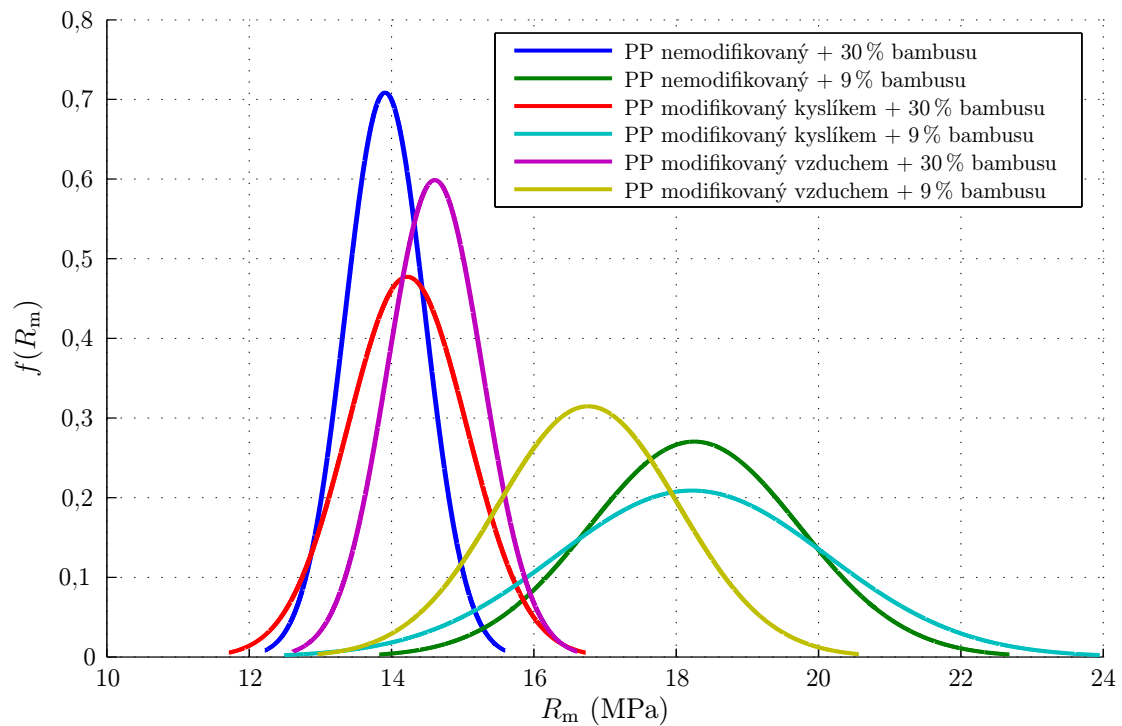
Obr. C.2: Gaussova křivka meze pevnosti v tahu matrice



Obr. C.3: Gaussova křivka celkového prodloužení při přetržení matrice

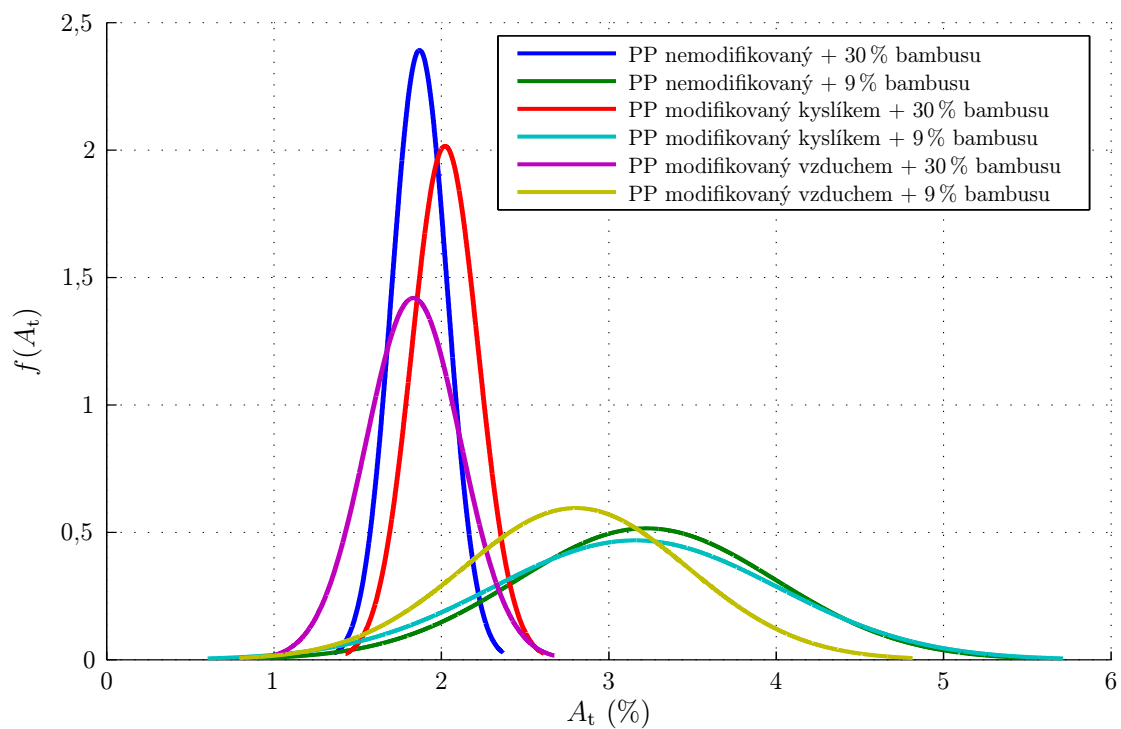


Obr. C.4: Gaussova křivka modulu pružnosti v tahu matrice + vlákna bambusu

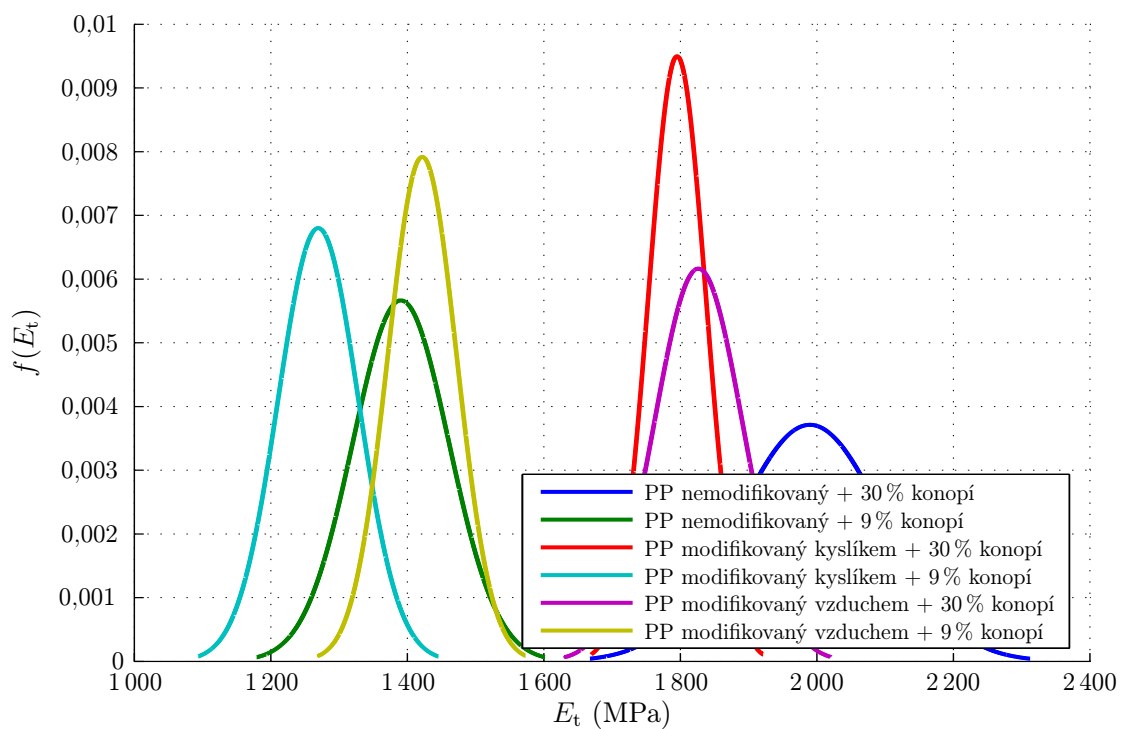


Obr. C.5: Gaussova křivka meze pevnosti v tahu matrice + vlákna bambusu

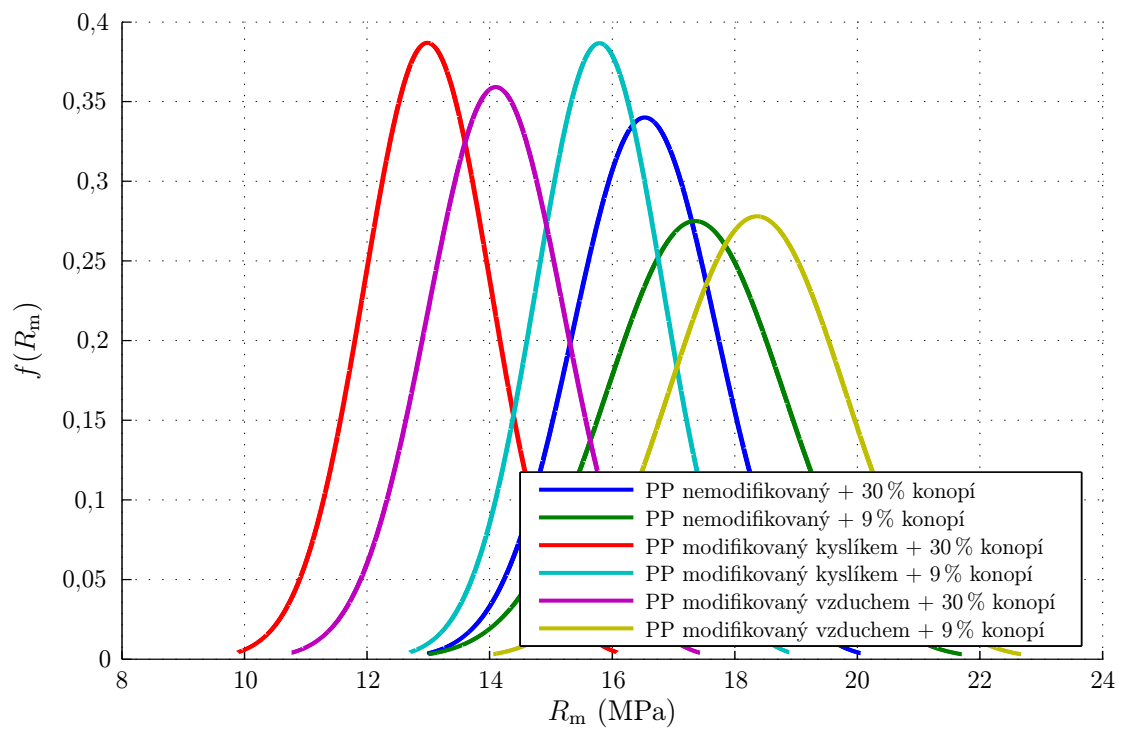




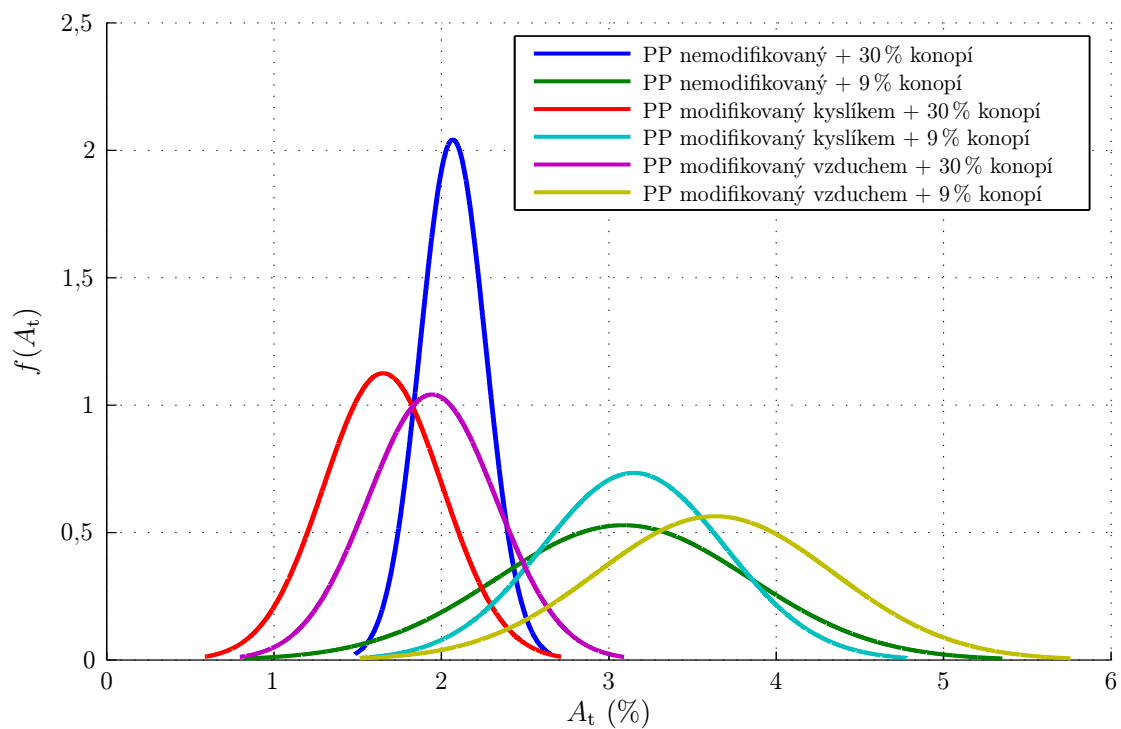
Obr. C.6: Gaussova křivka celkového prodloužení při přetržení matrice + vlákna bambusu



Obr. C.7: Gaussova křivka modulu pružnosti v tahu matrice + vlákna konopí



Obr. C.8: Gaussova křivka meze pevnosti v tahu matrice + vlákna konopí



Obr. C.9: Gaussova křivka celkového prodloužení při přetržení matrice + vlákna konopí

# Příloha D

## Materiálový list PP BE170MO

General Information		
<b>General</b>		
Material Status	• Commercial: Active	
Availability	• Africa • Asia • Europe	• Middle East • North America • South America
Test Standards Available	• ISO	
Additive	• Mold Release	
Features	• Copolymer, Block • Flow, Good • Impact Resistance, High • Mold Release, Good	• Odor, Low to None • Processability, Good • Stiffness, High • Taste, Low to None
Uses	• Crates • Household Goods • Packaging	• Pails • Parts, Engineering
Forms	• Pellets	
Processing Method	• Injection Molding	
<b>ASTM and ISO Properties <sup>1</sup></b>		
<b>Physical</b>	<b>Nominal Value Unit</b>	<b>Test Method</b>
Density	0.902 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230 °C/2.16 kg )	13.0 g/10 min	ISO 1133
Molding Shrinkage	1.00 to 2.0 %	ISO 294-4
<b>Mechanical</b>	<b>Nominal Value Unit</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Modulus (Injection Molded ) <sup>2</sup>	181000 psi	ISO 527-1, -2
Tensile Stress at Yield (Injection Molded ) <sup>3</sup>	3630 psi	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Yield (Injection Molded ) <sup>3</sup>	6.0 %	ISO 527-1, -2
<b>Impact</b>	<b>Nominal Value Unit</b>	<b>Test Method</b>
Charpy Notched Impact Strength <sup>4</sup> (-4 °F) (73 °F)	1.90 ft·lb/in <sup>2</sup> 3.81 ft·lb/in <sup>2</sup>	ISO 179
Multi-Axial Instrumented Impact Energy (-4 °F) (32 °F)	18.4 ft·lb 25.8 ft·lb	ISO 6603-2
<b>Hardness</b>	<b>Nominal Value Unit</b>	<b>Test Method</b>
Rockwell Hardness (R-Scale )	86	ISO 2039-2
<b>Thermal</b>	<b>Nominal Value Unit</b>	<b>Test Method</b>
HDT B (0.45 MPa) Unannealed	185 °F	ISO 75B-1, -2

---

Processing Information

---

Injection	Nominal Value	Unit
Processing (Melt) Temp	446 to 500	°F
Mold Temperature	50.0 to 86.0	°F
Injection Rate	Fast	
Holding Pressure	2900 to 7250	psi

---

Notes

---

<sup>1</sup> Typical properties: these are not to be construed as specifications.

<sup>2</sup> 0.039 in/min

<sup>3</sup> 2.0 in/min

<sup>4</sup> Type 1, Edgewise, Notch A

---