

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

LIBEREC 2008

HANA ROTTEROVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra textilní chemie

Obor: 3106T 002 Chemická technologie textilní

Mikrovlny v textilní chemii
Microwaves in textile chemistry

Diplomant: Hana Rotterová
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.
Konzultant: Doc. Ing. Jaroslav Odvárka, DrSc.

Rozsah práce: počet stran: 77
počet tabulek: 16
počet obrázků: 43
počet příloh: 3

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským). Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena 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 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 vědoma toho, že užít své diplomové práce 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).

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěla poděkovat Doc. Ing. Jakobovi Wienerovi, Ph. D. za jeho odborné vedení, konzultace a pomoc při zpracování diplomové práce. Mé poděkování patří také Josefovi Vojtěchovi za pomoc při úpravách experimentálního zařízení.

Dále bych chtěla poděkovat firmám Alligard, spol. s.r.o. a Lanex a.s. za poskytnutí potřebných textilních materiálů.

Poděkování si zaslouží i moje rodina za podporu a vytvoření potřebného zázemí pro celé mé vysokoškolské studium.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá využitím mikrovlnného záření v textilním průmyslu. Byla zjišťována možnost využití mikrovlnného záření při barvení polyesterových a polyamidových textilních materiálů.

Teoretická část této diplomové práce se zabývá teorií elektromagnetického pole, současnými aplikacemi mikrovlnného záření na textilní materiály, popisem polyesterových a polyamidových vláken – jejich složením, strukturou, vlastnostmi a výrobou.

Experimentální část byla prováděna na originálním mikrovlnném zařízení, které bylo realizováno ve spolupráci s ČVUT FEL. Toto zařízení využívá elektromagnetické záření o frekvenci 2,45 GHz. Experimenty byly zaměřeny na dosahování středních a tmavých odstínů pomocí disperzních a kyselých barviv.

ANOTATION

The diploma thesis is dealing with a utilization of a microwave radiation in textile industry. It was investigated a possibility of using a microwave radiation in coloration of polyester's and polyamide's fabric materials.

The theoretical part of this dissertation is concerned with a theory of the electromagnetic field, contemporary applications of microwave radiation in the fabric materials, description of polyester's and polyamide's staples, their constitution, structure, character and production.

The experimental (laboratory) part was engaged in original microwave radiation, which was carried out in cooperation with ČVUT FEL. This radiation is making use of the electromagnetic radiation at the frequency of 2,45 GHz. The experiments were focused on getting medium and dark shades by virtue of dispersed and acid dyes.

KLÍČOVÁ SLOVA

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| ➤ Elektromagnetické pole | Electromagnetic field |
| ➤ Mikrovlnný ohřev | Microwave heat |
| ➤ Aplikace mikrovln | Application microwaves |
| ➤ Polyesterové vlákno | Polyester fibre |
| ➤ Polyamidové vlákno | Polyamid fibre |
| ➤ Mikrovlnná trouba | Microwave oven |
| ➤ Vlnovod | Waveguide |
| ➤ Barvení | Colouration |

Obsah:

Seznam použitých zkratk a symbolů:	10
1 Úvod	11
2 Elektromagnetické pole	13
2.1 Elektromagnetické spektrum	13
2.2 Elektromagnetické vlnění	15
2.3 Interakce elektromagnetické vlny materiálem	16
2.4 Mikrovlnný ohřev	17
3 Aplikace mikrovln na textilní materiál	19
3.1 Sušení.....	19
3.1.1 Rozdíly mezi konvenčním a mikrovlnným sušením.....	19
3.1.2 Mikrovlnné sušení.....	20
3.1.3 Kombinované sušení.....	22
3.2 Čištění	22
3.3 Rozpojování balíků vlny	22
3.4 Finální úpravy	22
4 Polyesterová vlákna	24
4.1 Historický vývoj.....	24
4.2 Chemické složení polyesteru	25
4.3 Struktura polyesteru	25
4.3.1 Molekulární struktura.....	26
4.3.2 Nadmolekulární struktura	26
4.4 Vlastnosti polyesteru.....	27
4.4.1 Geometrické vlastnosti.....	27
4.4.2 Mechanické vlastnosti.....	28
4.4.3 Chemické vlastnosti	29
4.4.4 Termické vlastnosti.....	29
4.4.5 Další vlastnosti.....	30
4.5 Výroba polyesteru	30
4.6 Barvení polyesterových vláken.....	33
4.6.1 Barvení polyesteru disperzními barvivy	34
5 Polyamid	36
5.1 Historický vývoj.....	36
5.2 Chemické složení polyamidu	36
5.3 Struktura polyamidu.....	37
5.4 Vlastnosti polyamidu	38
5.4.1 Geometrické vlastnosti.....	38
5.4.2 Mechanické vlastnosti.....	38
5.4.3 Chemické vlastnosti	39
5.4.4 Termické vlastnosti	39
5.4.5 Další vlastnosti.....	40
5.5 Výroba polyamidu	41
5.5.1 Vlákna z polyamidu 6	41
5.5.2 Vlákna z polyamidu 6.6.....	42

5.6 Barvení polyamidových vláken	43
5.6.1 Barvení polyamidu disperzními barvivy.....	43
5.6.2 Barvení polyamidu kyselými barvivy	44
6 Experimentální část	Chyba! Záložka není definována.
6.1 Popis experimentálního zařízení	Chyba! Záložka není definována.
6.1.1 Magnetron	Chyba! Záložka není definována.
6.1.2 Vlnododový aplikátor	Chyba! Záložka není definována.
6.1.3 Celková soustava	Chyba! Záložka není definována.
6.1.4 Vyzařování soustavy	Chyba! Záložka není definována.
6.2 Barvení polyesteru a polyamidu	Chyba! Záložka není definována.
6.2.1 Popis experimentu.....	Chyba! Záložka není definována.
6.2.2 Použitý materiál	Chyba! Záložka není definována.
6.2.3 Použitá barviva.....	Chyba! Záložka není definována.
6.2.4 Použité chemikálie	Chyba! Záložka není definována.
6.2.5 Pracovní postup barvení polyesterové tkaniny.....	Chyba! Záložka není definována.
6.2.6 Pracovní postup barvení polyamidového lana	Chyba! Záložka není definována.
6.3 Přibližná teplota uvnitř nábalu	Chyba! Záložka není definována.
7 Závěr	Chyba! Záložka není definována.
8 Seznam použité literatury:	76

Seznam použitých zkratek a symbolů:

Zkratky:	
CO	Bavlna
DMF	Dimethylformamid
HET	Bis-(hydroxyethyl)-tereftalát
LOI	Limitní oxidační číslo
MP	Mokrý přivažek
PA 6	Polyamid 6
PA 6.6	Polyamid 6.6
PE	Polyethylen
PL	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
TPP	Textilní pomocné přípravky
Symbols:	
B	Magnetická indukce [T]
c	Rychlost světla ve vakuu [3×10^8 m/s]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
f	Frekvence [Hz]
h	Planckova konstanta [$= 6,65 \times 10^{-34}$ J·s = 4,1 μ eV/GHz]
m_s	Hmotnost suché textilie [g]
m_v	Hmotnost kapaliny v textilií [g]
P	Energie absorbovaná v jednotce objemu [W/m^3]
T _g	Teplota skelného přechodu [°C]
ϵ'	Permitivita [F/m]
ϵ''	Dielektrický ztrátový faktor materiálu
λ	Vlnová délka [m]

1 Úvod

Mikrovlny byly objeveny na počátku 40tých let v Anglii na univerzitě v Birminghamu. První využití mikrovln se uskutečnilo během 2. světové války ve formě radaru.

V roce 1947 si všiml zaměstnanec americké firmy Raytheon (výrobce radaru), že se mu v blízkosti radaru roztavila teplem čokoláda. To ho přivedlo na myšlenku využít mikrovlny k ohřevu a zkonstruovat mikrovlnou troubu. První patent se objevil v roce 1952 a první mikrovlnná trouba (zatím dost primitivní) se objevila v roce 1961. Byla velká jako skříň a stála 5000 dolarů. Zařízení se používalo pouze pro velké kuchyně a jeho vysoké pořizovací náklady, nízká spolehlivost a bezpečnost způsobily, že se novinka hned neujala. Pro domácnosti se mikrovlnné trouby začaly rozšiřovat až v 80tých letech, v důsledku vyřešení japonské technologie sériové výroby magnetronů.

Dnes má mikrovlnný ohřev široké využití především k účinnému a energeticky výhodnému sušení materiálů. Mikrovlny se využívají k sušení dřeva, papíru, keramických a farmaceutických produktů, různých granulovaných materiálů nebo i přáden v textilním průmyslu.

Jinou oblastí, ve které nachází mikrovlny nejčastější uplatnění, jsou telekomunikace a přenos dat. Ve světě je známé také použití mikrovln k předehřátí plastových granulátů před tvarováním, ke spojování plastů nebo jiných materiálů, ke slinování keramických výrobků nebo při vybarvování textilií [1, 2].

Princip mikrovlnného ohřevu spočívá v přeměně elektromagnetické energie na energii tepelnou, která vzniká působením pole na polární molekuly materiálu. Bipolární molekuly vody se natácejí podle změny střídavého elektromagnetického pole, což je až 10^9 krát za sekundu. Přitom dochází k mezimolekulárnímu tření a překonávání mezimolekulárních sil, čímž vzniká teplo a dochází k rychlému ohřevu materiálu. Mikrovlny mohou pronikat do určité hloubky materiálu, podle jeho dielektrických parametrů, čímž je materiál ohříván současně uvnitř i na povrchu, a tudíž je tento proces nezávislý na tepelné vodivosti textilií [3].

Výhodou mikrovlnného ohřevu je současný ohřev v celém objemu materiálu. Materiál se ohřívá ve všech místech stejně. Lze tak dosáhnout vyšší teploty uvnitř než na povrchu materiálu.

U ohřevu textilních materiálů je problém s energetickou účinností u tenkých materiálů. Čím méně materiálu je ohříváno, tím méně energie je absorbováno. Další problém je s nehomogenitou elektrického pole [4].

2 Elektromagnetické pole

2.1 Elektromagnetické spektrum

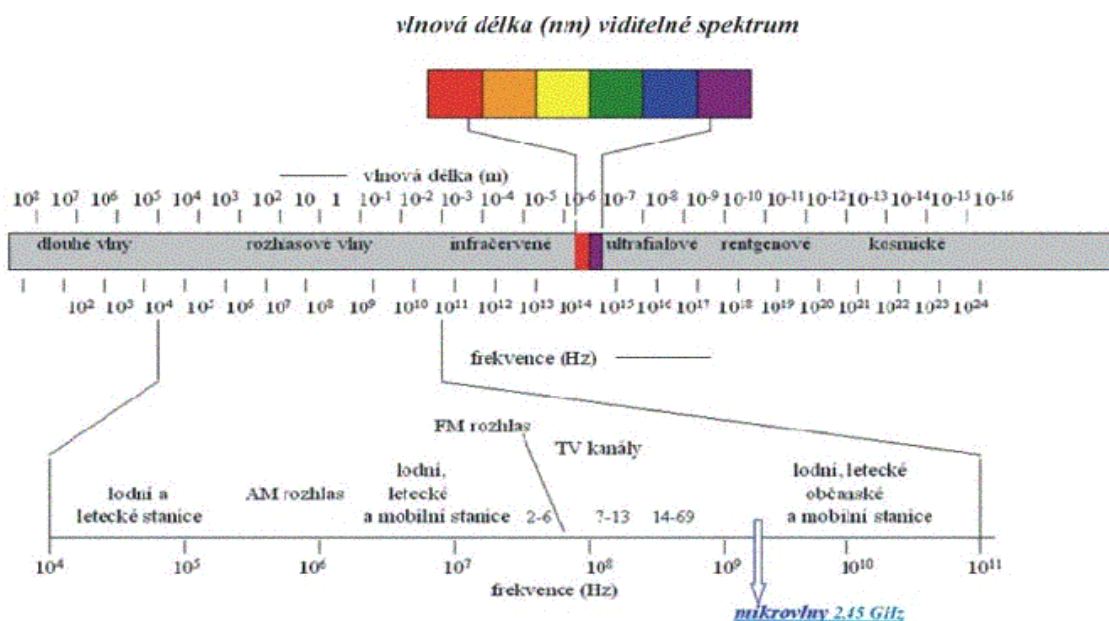
Elektromagnetické spektrum, někdy zvané Maxwellova duha, zahrnuje elektromagnetické záření všech možných vlnových délek. Elektromagnetické záření o vlnové délce λ (ve vakuu) má frekvenci f a jemu připisovaný foton má energii E . Vztah mezi nimi vyjadřují následující rovnice:

$$\lambda = c/f \quad \text{a} \quad E = h \cdot f,$$

kde c je rychlost světla (3×10^8 m/s) a $h = 6,65 \times 10^{-34}$ J·s = 4,1 μ eV/GHz je Planckova konstanta [5].

Existují různé druhy elektromagnetického záření, lišící se vzájemně vlnovou délkou. Největší vlnovou délku, a tudíž nejmenší frekvenci i energii mají dlouhé rádiové vlny. Za rádiovými vlnami následuje viditelné světlo, po něm rentgenové. Největší frekvenci a energii má záření gama. Této řadě různých typů elektromagnetického vlnění se tedy říká elektromagnetické spektrum (obr. 2.1) [6].

Přestože rozčlenění jednotlivých druhů elektromagnetické energie je vymezeno přesně, ve skutečnosti se jednotlivé oblasti vzájemně překrývají. Např. některé nízko energetické γ paprsky mají ve skutečnosti větší vlnovou délku než vysoko energetické RTG záření. [7].



Obr. 2.1: Elektromagnetické spektrum

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny, které zaujímají v elektromagnetickém spektru oblast mezi infračerveným zářením a radiovými vlnami. Jedná se o oblast frekvencí od 300 MHz do 30 GHz, což odpovídá vlnovým délkám od 1 cm do 1 m. Pro použití v mikrovlnných troubách je povolena frekvence 2450 MHz, to odpovídá vlnové délce 12,2 cm. K tomu, proč byla zvolena tato frekvence, jsou dva důvody: jednak je to velmi vhodná oblast pro ohřev vody a za druhé je to vymezená frekvence z důvodu vyloučení vzájemného rušení s telekomunikačními frekvencemi (navigace letadel, televizní vysílání, mobily atd.) [8].

Tab. 2.1: Elektromagnetické spektrum [9]

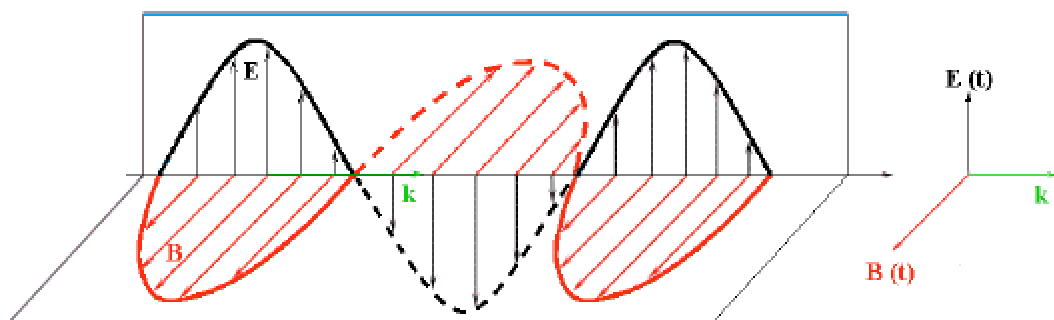
český název	frekvence	vlnová délka	anglické označení
extrémně dlouhé vlny	0,3 - 3 kHz	$10^3 - 10^2$ km	Extremely Low Frequency (ELF)
velmi dlouhé vlny	3 - 30 kHz	$10^2 - 10$ km	Very Low Frequency (VLF)
dlouhé vlny (DV)	30 - 300 kHz	10 - 1 km	Low Frequency (LF)
střední vlny (SV)	0,3 - 3 MHz	1 - 0,1 km	Medium Frequency (MF)
krátké vlny (KV)	3 - 30 MHz	100 - 10 m	High Frequency (HF)
velmi krátké vlny (VKV)	30 - 300 MHz	10 - 1 m	Very High Frequency (VHF)
ultra krátké vlny (UKV)	0,3 - 3 GHz	1 - 0,1 m	Ultra High Frequency (UHF)
mikrovlny	3 - 30 GHz	100 - 10 mm	Super High Frequency (SHF)
mikrovlny	30 - 300 GHz	10 - 1 mm	Extremely High Frequency (EHF)
infračervené záření	$10^{10} - 10^{14}$ Hz	1 mm - 1 mm	Infra Red (IR)
viditelné záření	10^{14} Hz	400 - 900 nm	Visible (VIS)
ultrafialové záření	$10^{14} - 10^{16}$ Hz	400 - 10 nm	Ultra Violet (UV)
rentgenovo záření	$10^{16} - 10^{19}$ Hz	10 - 0,1 nm	X-Rays
gama záření	$10^{19} - 10^{24}$ Hz	$10^{-10} - 10^{-14}$ m	Gamma Rays

Často používané je také pásmo kolem 915 MHz ($\lambda = 32,75$ cm), jehož výhodou je přibližně dvaapůlkrát větší hloubka vniku do ohřívajícího materiálu, než jaké se dosahuje u frekvence 2450 MHz. Pro aplikace vyžadující přesné zacílení vyzařované energie a pouze povrchové působení se využívá pásmo 5,8 GHz ($\lambda = 5,17$ cm) a 24,125 GHz ($\lambda = 1,25$ cm). Mikrovlnná energie zpravidla vniká do hloubky v řádu jednotek až desítek centimetrů [10].

2.2 Elektromagnetické vlnění

První úplné vysvětlení teorie elektromagnetických vln podal v roce 1865 James Clerk Maxwell. Z jeho teorie elektromagnetického vlnění poprvé vyplynulo, že světlo je elektromagnetické vlnění. Na jeho počest se říká spektru elektromagnetických vln seřazených podle vlnové délky Maxwellova duha [11].

Elektromagnetická vlna je tvořena dvěma složkami - elektrickou a magnetickou. Ty jsou popisovány vektorem elektrické intenzity E a vektorem magnetické indukce B (obr. 2.2). Tato dvě pole se sinusově mění, přičemž výsledné sinusové změny těchto polí se šíří jako elektromagnetická vlna. Stručně řečeno směr vektoru E jednoznačně určuje směr vektoru B a jejich okamžité hodnoty jsou svázány rovnicí $\mathbf{E} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{c}$. Oba tyto vektory jsou kolmé na směr šíření určený vektorem \mathbf{k} a navíc jsou kolmé navzájem [12].



Obr.2.2: Elektromagnetická vlna [12]

Jednotlivé druhy elektromagnetického vlnění se od sebe liší např. vlnovou délkou, schopností pronikat látkami nebo vznikem. Mají však také spoustu společných vlastností. Všechny se ve vakuu šíří stejnou rychlostí jako světlo (tj. $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), všechny mají elektrickou i magnetickou složku, které nelze oddělit. Všechny druhy také při šíření podléhají ohybu vlnění, interferenci a v neposlední řadě také disperzi [11].

2.3 Interakce elektromagnetické vlny materiálem

Pokud se elektromagnetická vlna šíří volným prostorem a nepřichází do kontaktu s žádnou látkou, šíří se rychlostí světla c a nemění se její amplituda ani vlnová délka. Jestliže však elektromagnetické vlně leží v cestě nějaká látka, dochází mezi materiálem a vlnou k interakci [13].

Mikrovlnné záření většinou materiálů proniká jako sluneční světlo sklem. Některými materiály jsou silně pohlcovány a mikrovlnná energie se v nich přeměňuje na teplo. U jiných materiálů dochází především k odrazu mikrovln, na tomto principu je založeno jejich využití v radarech [2].

Z hlediska materiálu a jeho interakce s mikrovlnami existují tři možnosti (obr. 2.3):

- a) Transparentní (např. sklo, nepolární látky)
- b) Absorpční (např. voda, polární rozpouštědla)
- c) Odrážející (např. kovy) [1]

Absorpce

Tuto vlastnost mají materiály obsahující i malé množství polárních molekul, schopných absorbovat elektromagnetické pole (např. voda, soli, uhlík apod.). Přičemž hloubka vniku je limitována hodnotou jejich ztrátového činitele. Tento typ materiálu elektromagnetické vlny ohřívají - procházejí jím podobně jako světlo různě tmavým barevným sklem.

Při absorpci mikrovln v materiálu se snižuje amplituda vlny. Míra absorpce je charakterizována pomocí penetrační hloubky, což je vzdálenost, kterou mikrovlnné záření v materiálu musí projít, aby jeho intenzita klesla na 13,53 % původní hodnoty [14].

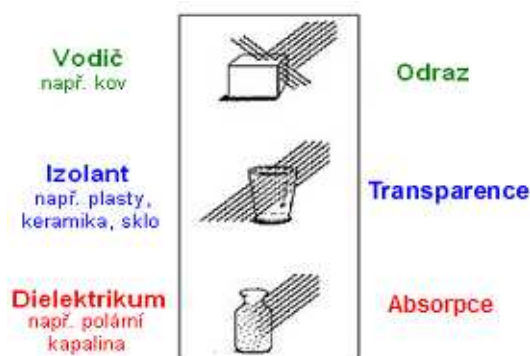
Odráž

Materiály (zejména kovy), které elektromagnetické vlny neabsorbují, ale odrážejí, nelze mikrovlnami ohřívát, avšak detekce odraženého výkonu slouží k radiolokaci, která se široce uplatňuje v dopravě, průmyslu i v obraně.

Transparence (průsvitnost)

Touto vlastností se vykazují materiály bez bipolárního elektrického náboje, jako je vzduch, některé druhy skla, polyetylén, teflon, polystyrén aj. Ty na elektromagnetické pole nereagují.

Uvedené vlastnosti jsou velmi často závislé na teplotě. Někdy se stává, že materiál, který je při pokojové teplotě zdánlivě transparentní, je při teplotách nad 1000 °C možné dielektricky ohřát [15].



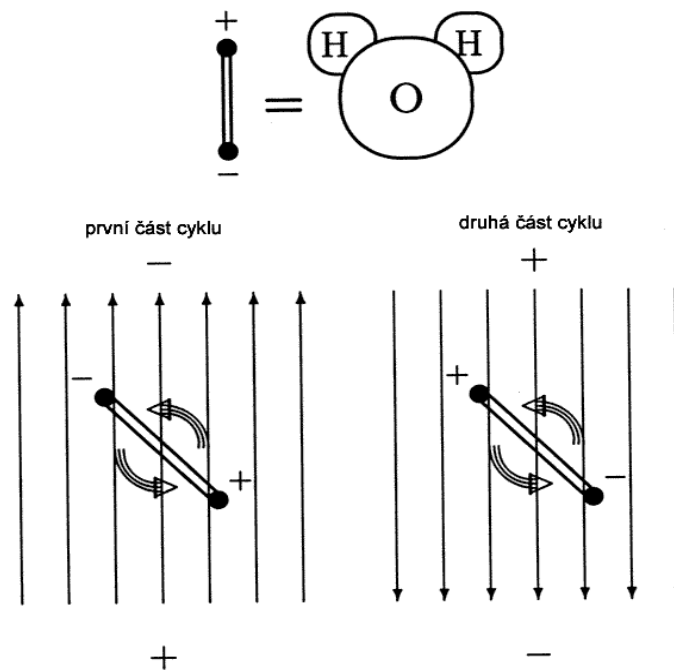
Obr. 2.3: Interakce elektromagnetických vln s materiálem [16]

2.4 Mikrovlnný ohřev

Z obecného pohledu nás zajímá především interakce mikrovln s látkami, které mikrovlny absorbují, např. látky polární. Voda je polární látka se záporným nábojem na atomu kyslíku a kladným nábojem na atomech vodíku. V normálním stavu jsou molekuly vody v neuspořádané. V elektrickém poli dochází k orientaci molekul podle polarity, kladná část se natočí k zápornému pólu a záporná část ke kladnému. V mikrovlnném poli se polarita mění $2,45 \cdot 10^9$ krát za sekundu. Polární molekula se snaží tyto rychlé změny sledovat, je nucena se těmto rychlým změnám přizpůsobit, ale sotva se přizpůsobí, polarita se opět změní [1,2].

Pro mikrovlnný ohřev se tedy využívá jevu, kdy se permanentní dipóly ve stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nejpříjemnější polohy (obr. 2.4). Snaha částice vyrovnat se s měnícím se elektrickým polem mikrovln vede k rotačnímu pohybu, při němž dochází ke kolizím a tření se sousedními molekulami a ke vzniku tepla. Nejběžnější molekulou, jejíž permanentní dipólový moment vede k její

rotaci při ozařování mikrovlnami, je již zmíněná voda, která je zároveň ve značném množství přítomna v biologických materiálech a způsobuje tak jejich ohřev v mikrovlnné troubě [14].



Obr. 2.4: Princip mikrovlnného ohřevu

Mechanismus přeměny mikrovlnné energie na teplo je dán vztahem:

$$P = 2 \pi f \epsilon' \epsilon'' E^2$$

P ... energie absorbovaná v jednotce objemu (W/m^3)

f ... frekvence mikrovlnného pole (2450MHz)

ϵ' ... permitivita (F/m)

ϵ'' ... dielektrický ztrátový faktor materiálu

E ... intenzita elektrického pole uvnitř materiálu (V/m) [1]

3 Aplikace mikrovln na textilní materiál

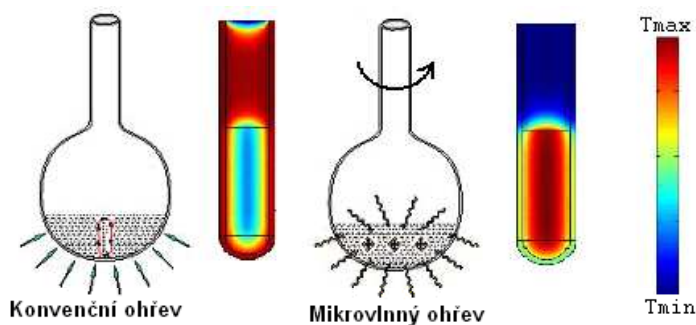
Vynikající vlastnosti mikrovlnného ohřevu se uplatňují v textilním průmyslu, zejména při sušení všech druhů textilu a textilních výrobků během výrobního procesu. Jak při sušení, tak i při ostatních aplikacích se dosahuje urychlení, snížení nákladů, zlepšení kvality a snížení zátěže životního prostředí. Mikrovlnný ohřev většinou nahrazuje nebo doplňuje odpovídající současné technologie. Řada aplikací využívá kromě mikrovlnného ohřevu i ohřevu na nižších kmitočtech, tzv. radiofrekvenčního ohřevu, nebo kombinace s konvenčním ohřevem [17].

3.1 Sušení

Sušením rozumíme děj, při kterém se obecně odstraňuje voda obsažená v materiálu. Tepelný způsob odstraňování vlhkosti je energeticky velmi náročný proces, a proto se hledají způsoby jak jej zefektivnit. Sušení je aplikace, u které se s výhodou dá využívat mikrovlnné energie [18].

3.1.1 Rozdíly mezi konvenčním a mikrovlnným sušením

Při konvenčním ohřevu postupuje teplo z povrchu dovnitř a vlhkost vystupuje zevnitř na povrch, kde se odpařuje. Vlhkost tedy směřuje proti teplu. Při hloubkovém působení mikrovln se ohřívá vnitřek produktu a vlhkost je vytěšňována směrem k místu nižšího tlaku, tedy na povrch materiálu, který je chladný, protože okolní vzduch se mikrovlnami neohřívá. Nejvyšší teplota je uvnitř materiálu a klesá směrem k povrchu (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Porovnání mechanismů sušení [19]

Klasické sušení může na povrchu kusových produktů vytvořit suchou vrstvu, která přeruší kapilární tok zevnitř materiálu a začne produkt tepelně izolovat, čímž zhorší prostupnost vody materiálem. Naopak při mikrovlnném sušení se suchá vrstva nevytváří, protože voda, která je vypuzovaná z jádra materiálu, udržuje povrch vlhký [20].

Sušení s využitím mikrovlnného ohřevu má řadu výhod. Především spočívají v tom, že mikrovlnná energie působí selektivně hlavně na vlhkost (vodu, barvy, rozpouštědla). Tak se dosahuje rovnoměrného vysušení přesně na požadovanou hodnotu vlhkosti rychle a velmi šetrně. Zatímco např. v konvenčních bubnových sušičkách se používá vzduch o teplotě až 175 °C a látka se zahřeje až na 65 °C, při použití mikrovln postačuje v řadě případů teplota kolem 38 – 46 °C. To omezuje srážlivost a prodlužuje životnost textilních výrobků. Lze dosáhnout i zvýšení ohnivzdornosti textilních materiálů.

Sušení se jako jedna ze základních výrobních operací v textilním průmyslu uplatňuje v řadě operací:

- Kontinuální sušení plochých a trubkových pletenin a látek. Při jedné aplikaci se dosahuje kapacity až 100 km / týden při výkonu 75 kW. Jiné zařízení usuší až 180 t textilu za týden při výkonu 3 x 150 kW. Při sušení froté ručníků se dosahuje vysoké měkkosti i bez použití změkčovadel. Mikrovlnami se s výhodou mohou sušit i koberce, potíštěné a povlakované látky, kompozitní a laminované struktury.
- Kontinuální sušení cívek s vlákny z umělého hedvábí i dalších materiálů.
- Sušení latexové podložky koberců.
- Sušení netkaných textilií (plsti atp.).
- Sušení odpadů z filtračních lisů [18].

3.1.2 Mikrovlnné sušení

Mikrovlny působí téměř výhradně na molekuly vody, která je vysoce polární látkou ve srovnání s ostatními složkami základního materiálu, a naopak vůbec neúčinkují na zcela suché oblasti v produktu. To je ideální stav pro vyrovnání vlhkosti v produktu, jestliže je před zpracováním nerovnoměrná [18].

Naproti tomu u mikrovlnného sušení může docházet k nerovnoměrnosti sušení vlivem místně proměnlivého mikrovlnného pole. To má za následek lokální rozdíly v intenzitě sušení. V sušších místech může dojít k degradaci materiálu vlivem přesušení. Proto je třeba, aby se materiál při sušení pohyboval, stejně jako je tomu v mikrovlnných troubách, kde je právě z tohoto důvodu otočný talíř.

Při sušení plošných útvarů pomocí mikrovln je rozdílná absorpce energie u tenkých a silných materiálů. Čím více materiálu je ohříváno, tím je množství absorbované energie větší, vzniká tedy problém u velmi tenkých tkanin [4]. Samotná vazba tkanin (popř. pletenin) nevykazuje ve všech místech jednotnou tloušťku materiálu a je tedy značně nehomogenní. To může mít za následek nestejnou vysoušení [18].

Sušení pomocí mikrovln se používá i v dalších odvětvích, nejen v textilu. Je zkoumáno na léčivech, keramice, papíru a dřevu. Po povodních byl výzkum cílen na archiválie, přičemž se tato metoda ukázala schůdnou a hospodárnou a byla postavena i kontinuální mikrovlnná sušárna. Mnohé poznatky z této oblasti jsou součástí licencí a jsou chráněny patenty [21].

Obecně se mikrovlnné sušení vyznačuje:

- vysokou energetickou účinností a rychlým odvodem vody,
- úsporou energie – nevznikají energetické ztráty vlivem ohřevu sušícího prostředí,
- kratší dobou procesu, až o 70 %,
- velmi přesným řízením tepelných dávek,
- v řadě případů není prioritní maximální rychlost odpařování, ale sušení je prováděno při poměrně nízkých teplotách, které postačují k vypařování vody (optimální bývá teplota kolem 60 °C),
- v porovnání s klasickým sušením nedochází při mikrovlnném sušení u teplotně labilních materiálů k degradaci důležitých složek (vitaminy, silice apod.) a tím se nemění ani senzorické vlastnosti,
- při používaných sušících teplotách a dobách působení je ve většině případů zajištěn současně i devitalizační účinek na mikrobiální patogenní činitele,
- snížením nákladů a nároků na prostor,
- zajištění hygienického prostředí – minimum prachu, hluku, vibrací apod. [18]

3.1.3 Kombinované sušení

Na počátku se z produktu vnějším konvenčním ohřevem rychle uvolní značná část vlhkosti. Pokud při tom může dojít k přehřátí povrchu materiálu, je nutné během vysoušecího procesu provádět přestávky k vyrovnání teploty — v průběhu těchto přestávek se voda z materiálu odpařuje samovolně. Potom mikrovlny rychle vypudí skoro celou zbývající vlhkost z hloubky materiálu k jeho povrchu, kde ji lze opět odpařit klasickými systémy. Takto se doba sušení zkrátí až o 80 % [20].

3.2 Čištění

Čištění a praní látek, oděvů a dalších textilií s využitím mikrovlnného ohřevu probíhá při podstatně nižší spotřebě čisticích roztoků. Současně lze v řadě případů dosahovat i bělicích, desinfekčních a dekontaminačních účinků. Konstrukce zařízení je různá. Kromě větších průmyslových zařízení byly s úspěchem vyzkoušeny i bubnové a stolní pračky. Spolehlivě se odstraňují např. skvrny od čaje a červeného vína na bavlně, skvrny od čaje, kávy a červené papriky na směsi polyester/bavlna.

3.3 Rozpojování balíků vlny

Rozpojování balíků vlny je významnou průmyslovou aplikací mikrovlnného ohřevu. Dosahuje se podstatně rychlejšího a šetrnějšího zpracování ve srovnání s konvenčními technologiemi.

3.4 Finální úpravy

Finální úprava textilních výrobků s využitím mikrovlnného ohřevu zahrnuje především fixaci barviv a finišerů, při němž se dosahuje vysoké stabilizace barev. Důležitá je přitom homogenizace teploty. V některých případech se teplota povrchu a vnitřku materiálu liší jen o $\pm 0,1$ °C.

Uvedené procesy jednak našly již průmyslové využití, jednak probíhá v posledních letech intenzivní výzkum a patentová aktivita. Zejména v zemích s vyšší životní úrovní se počítá i se širokým využitím v podnicích služeb, ale i v domácnostech, zejména pro čištění a praní oděvů. Efektivnost procesů s mikrovlnným ohřevem a snížení zátěže životního prostředí je předpokladem dalšího rozšíření této technologie [17].

4 Polyesterová vlákna

4.1 Historický vývoj

Přírodní polyester je znám asi od roku 1830, první syntetický polyester se používal v 1. světové válce jako impregnační materiál. Vlákno ze syntetického polyesteru bylo vynalezeno v Anglii v roce 1941 [22]. V tomto roce se anglickým chemikům Whinfieldovi a Dicksonovi poprvé podařilo připravit tato vlákna vyhovujících vlastností. Vyrábí se z kyseliny tereftalové a ethylenglykolu.

Vlastní vývoj výroby polyesterových vláken byl podstatně zpožděn 2. světovou válkou. S intenzivním rozvojem se začalo až po roce 1945. Přesto, že v oboru výroby syntetických vláken již byly určité zkušenosti, trval vývoj polyesterových vláken poměrně dlouho. Jednou z hlavních příčin bylo, že jedna ze základních surovin, kyseliny tereftalová, nebyla do té doby provozně vyráběna a kromě toho má vlastnosti, které její výrobu v požadované čistotě velmi znesnadňují.

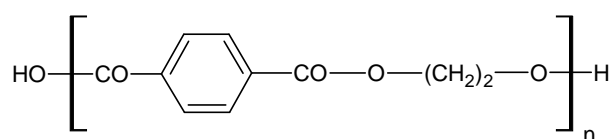
Roku 1948 byla konečně zahájena v Anglii poloprovozní výroba polyesterových vláken. Trvalo však ještě určitý čas, než byli získáni zpracovatelé pro tento nový druh vlákna, a tak byla velkovýroba zahájena až v roce 1952, a to současně v Anglii a v USA. Velkovýroba potvrdila vhodnost polyesterových vláken pro poměrně široký sortiment textilních výrobků [23].

S vyrobenými cca. 25 miliony tun v roce 2005 je to v současné době ve světě (po bavlně) druhé nejpoužívanější textilní vlákno. Výroba polyesterových vláken v tzv. vyspělých zemích se však v posledních 30 letech postupně snižuje. K největším producentům dnes patří Čína a Indie. Západní Evropa dodávala v roce 2005 asi 1,3 miliony tun, v Plané nad Lužnicí vyrobili ještě v roce 1989 přes 500 tun, v posledních letech se Český statistický úřad o tomto druhu výroby vůbec nezmiňuje [22].

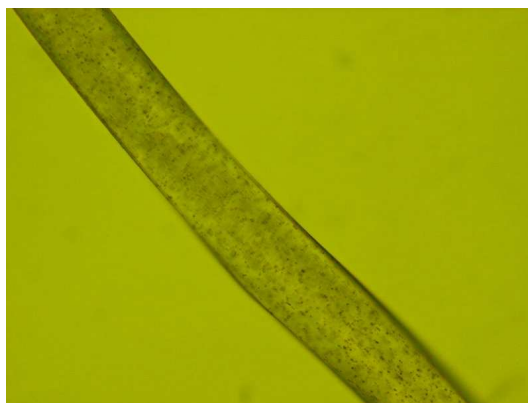
4.2 Chemické složení polyesteru

Polyestery jsou polymery, v jejichž hlavním řetězci se opakuje esterová skupina $[-CO-O-]$. V textilním průmyslu se termín polyester používá v užším slova smyslu pro nejběžnější a nejrozšířenější polyesterová vlákna vyráběná z polyethyltereftalátu (PET). Klasické typy polyesterového vlákna se tedy připravují polykondenzací kyseliny tereftalové a ethylenglykolu [24].

Základní jednotka polyesteru vypadá takto (obr. 4.1):



Obr. 4.1. Základní strukturní jednotka



Obr. 4.2: Polyesterové vlákno 400x zvětšené [22]

4.3 Struktura polyesteru

Znalosti struktury vláken jsou velmi důležité. Umožňují předvídat nejen vlastnosti polymerů, ale také jejich záměrné modifikace vyvolané změnami struktury. Ve srovnání s nízkomolekulárními látkami je struktura polymerů značně komplikovanější. I v nejjednodušším případě obsahují polymery řetězce stejného chemického složení, avšak různé délky a různých konformací. Nadto se jednotlivé řetězce mohou vzájemně více či méně seskupovat, takže vytvářejí oblasti krystalické

s perfektním trojrozměrným uspořádáním, celé spektrum hůře uspořádaných oblastí parakrystalických a oblasti zcela neuspořádané amorfni. Tyto oblasti ještě mohou mít různou orientaci vzhledem k ose vlákna [25].

Při popisu struktury polymerů se obvykle uvažují pouze dvě hierarchické úrovně:

- molekulární struktura (molekulární řetěze a jejich stavba)
- nadmolekulární struktura (krystalické a amorfni oblasti)

4.3.1 Molekulární struktura

Řetězce polyethyltereftalátu jsou lineární, s pravidelně se střídajícími částmi kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Jednotlivá benzenová jádra v sousedních řetězcích jsou uspořádána téměř komplanárně, což umožňuje vznik disperzních van der Waalsových sil.

Celková velikost sekundárních sil jednotky PET je $1,37 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Z toho připadá na disperzní síly indukované benzenovým jádrem $1,02 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Pevnost PET vláken je dána především tuhostí benzenových jader, která svírají s rovinou esterových vazeb úhel pouze 12° .

4.3.2 Nadmolekulární struktura

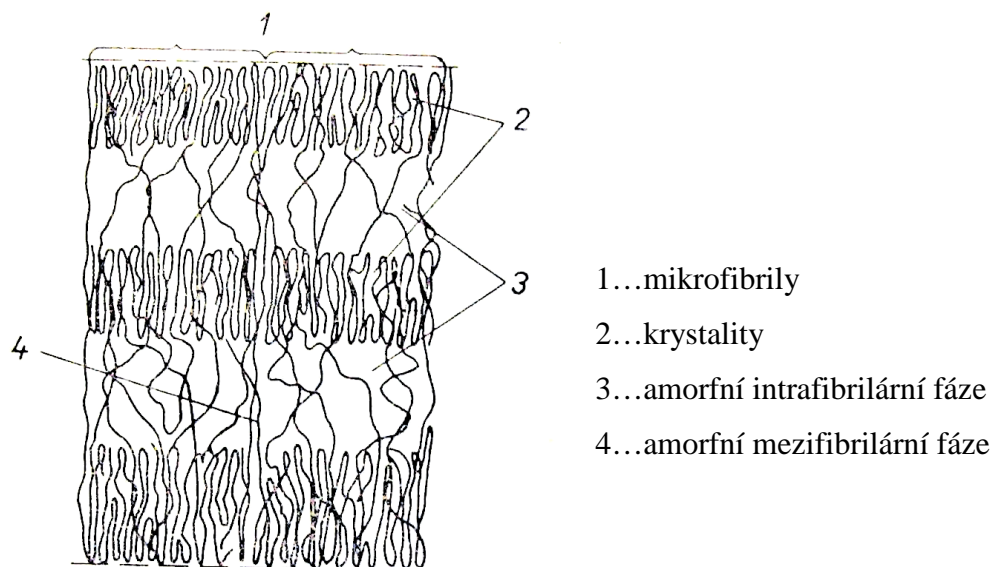
Základní jednotkou struktury všech semikrystalických vláken jsou mikrofibrily. Jejich tloušťka se u PET vláken pohybuje kolem 10 nm a jejich délka je srovnatelná s délkou makromolekulárních řetězců kolem 1 μm . Mikrofibrily jsou tedy tenké dlouhé útvary, které mají v příčném řezu tvar elipsy nebo rovnoběžníku.

Samotné fibrily se skládají z periodicky se opakujících úseků amorfniích a krystalických. Dlouhá perioda, tj. délka sousedního krystalického a amorfniího úseku, se u všech semikrystalických vláken pohybuje kolem 15 nm. Osa krystalitů je u PET vláken skloněna k ose mikrofibrily přibližně o 12° .

Jednotlivé mikrofibrily se skládají do svazků – fibril, které jsou vzájemně propojeny mezifibrilárními vaznými řetězcí. Vlivem nedokonalosti uspořádání fibrilárních svazků se ve struktuře vyskytují mezifibrilární amorfni oblasti. Tato tzv. vlákenná struktura je výsledkem plastických deformací při prodloužení vláken.

Ukázalo se, že sorpční a mechanické vlastnosti PET vláken ovlivňuje v rozhodující míře stav mezifibrilární amorfní fáze. Ta se skládá z vazných řetězců, smyček, volných konců, případně i zapletenin řetězců.

Mikrofibrily mají význam hlavně pro zajištění stability vláken. Na základě těchto zjištění navrhl Prevorsek třífázový strukturní model pro polyesterová a polyamidová vlákna (obr. 4.3). Tento model se skládá z mikrofibril obsahujících střídavě amorfní a krystalické oblasti, které jsou vzájemně propojeny amorfní mezifibrilární fází tvořenou převážně vaznými molekulami.



Obr.4.3: Prevorsekův model struktury semikrystalických vláken [25]

4.4 Vlastnosti polyesteru

Polyesterová vlákna mají stejně jako ostatní vlákna kromě velmi dobrých vlastností i některé vlastnosti nežádoucí, které omezují oblast jejich použití. Vlastnosti polyesteru můžeme rozdělit do několika skupin [23]:

4.4.1 Geometrické vlastnosti

Ke geometrickým vlastnostem vláken patří např. délka vláken, tvar průřezu vlákna, jeho jemnost, zkadeření vlákna a charakter povrchu vláken.

Délka se přizpůsobuje délce vláken, s nimiž se má polyesterová stříž zpracovávat na směsné příze. U bavlny je to 30 až 40 mm, u vlny 65 až 110 mm apod.

Průřez je téměř vždy pravidelný kruhový. Výjimečně se pomocí speciálních trysek vyrábějí vlákna s hvězdicovým, hřebínkovým, nebo dokonce dutým průřezem. Jemnost se obvykle pohybuje od 0,75 den do 40 den. Zkadeření vlákna se posuzuje podle počtu obloučků na 1 cm jeho délky. Pohybuje se mezi 3 až 9 obloučky na 1 cm.

Povrch nematovaného vlákna je obvykle dokonale hladký. U matovaných vláken povrch poněkud zdrsňují vystupující zrnka titanové běloby [23].

4.4.2 Mechanické vlastnosti

Z mechanických vlastností polyesterových vláken jsou nejdůležitější pevnost, tažnost, elasticita a odolnost proti oděru. Jsou závislé na přípravě vláken a obecně jsou velmi dobré.

Pevnost se obvykle hodnotí v tahu, ve smyčce a v uzlu. Prostá pevnost v tahu se obvykle vyjadřuje jako síla potřebná k přetržení vlákna. Často se však jako jednotky pevnosti používá tzv. tržné délky, což je délka vlákna v km, při které se vlákno přetrhlo vlastní vahou. Pevnost zkoušená za mokra nevykazuje na rozdíl od jiných druhů vláken u polyesterů pokles proti pevnosti zkoušené za sucha. Pevnost se pohybuje od 3,8 do 7,2 cN/dtex.

Změna délky vlákna při jeho přetržení se nazývá tažnost a vyjadřuje se v procentech původní délky. Tažnost polyesterových vláken do značné míry závisí na technologii dloužení a fixace a pohybuje se u velmi pevných typů od 12 do 30 %, u ostatních od 30 do 60 %.

Významnou vlastností polyesterových vláken je jejich elasticita. Tu můžeme posuzovat podle toho, zda se po odlehčení síly, která způsobila jakoukoli deformaci, rychle materiál vrátil do původního tvaru a polohy. Zvlášť důležitá je u vláken elasticita po deformaci tahem a ohybem. Jedním z ukazatelů elasticity textilního materiálu je tzv. úhel zotavení, do kterého se vrátí předložená tkanina, zatížená po určitou dobu. Elastické zotavení se u polyesteru pohybuje v rozmezí od 85 do 90 %.

Odolnost proti oděru ukazuje životnost textilního výrobku vystaveného tření. U polyesterů je zvlášť velká a dosahuje téměř odolnosti vláken polyamidových [23, 26].

4.4.3 Chemické vlastnosti

Chemické vlastnosti jsou ovlivněny složením a strukturou polyesterových vláken. Benzenová jádra a methylenové skupiny jsou chemicky odolné, citlivější místa jsou esterové vazby [27].

Polyesterová vlákna velice dobře odolávají slabým minerálním i silným organickým kyselinám i při zvýšené teplotě. Pouze koncentrovaná kyselina sírová a dusičná dokáže polyester rozrušit už při normálních teplotách.

Alkáliím za studena polyesterová vlákna dobře odolávají, ale teplé alkalické roztoky způsobují pozvolnou hydrolýzu. Zajímavé je působení silných alkálií, které rozkládají polyesterová vlákna jen z povrchu a nevnikají dovnitř vlákna.

Také proti oxidačním i redukčním prostředkům vykazují značnou stálost. Jsou stále v běžných rozpouštědlech. Organická rozpouštědla používaná pro chemické čištění vlákna také nepoškozují. Vadí pouze chloroform za vyšší teploty, vlákna rozrušuje a vyvolává srážení. Pro chemické čištění musí být polyester dobře fixován [28]. Rozpouští se pouze za tepla v některých derivátech benzenu, popř. v jejich roztocích s chlorovanými uhlovodíky jako je krezol, nitrobenzen, fenol apod.

4.4.4 Termické vlastnosti

Vynikající vlastností polyesterových vláken je velká odolnost proti teplotě. V této odolnosti polyesterová vlákna předstihují všechny organické textilní vlákna. Polyesterová vlákna jsou prakticky nehořlavá, v plameni se smršťují a hnědě zabarvují za vzniku sazí a charakteristické vůně. V plameni udržovaný materiál odkapává v hořících kapičkách [23].

- teplota zesklnění: 77-80 °C
- teplota měknutí: 230 °C
- teplota tání: 258 °C
- hořlavost LOI: 20,6 %
- 120-130 °C – pevnost beze změny
- 180 °C – pevnost klesá na 50 % za několik dní [26]

4.4.5 Další vlastnosti

Odolnost proti účinkům světla a počasí je velmi dobrá. V tomto směru je z ostatních textilních vláken předčí pouze vlákna polyakrylová. Zvláště dobrá je stálost polyesterů proti slunečnímu světlu, je-li materiál chráněn sklem.

Nevýhodou polyesterových vláken je jejich navlhavost. Při normální vlhkosti vzduchu obsahují max. 0,5 % vody. Tato malá navlhavost je příčinou toho, že vlákna při styku s pokožkou nepůsobí příjemně. Výhodné však je rychlé schnutí výrobků z polyesterových vláken a stálost vlastností za mokra [23].

4.5 Výroba polyesteru

Výroba syntetických vláken je poměrně velmi složitá a skládá se vždy ze tří procesů, z nichž první je převážně chemické povahy a další dva mají charakter mechanicko-fyzikální.

Jsou to:

- a) příprava vláknotvorné látky
- b) zvlákňování (formování látky do tvaru vlákna)
- c) dloužení a úprava vláken pro textilní zpracování

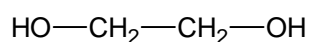
První fází výrobního postupu polyesterových vláken je příprava základních surovin: ethylenglykolu a kyseliny tereftalové. Výrobu polyesterových vláken lze dále rozdělit do tří výrobních procesů, které zahrnují řadu dalších výrobních operací.

Jsou to:

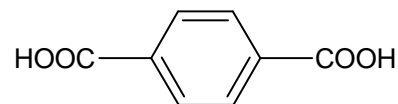
- a) Příprava polykondenzátu, při níž se chemickými reakcemi mění základní suroviny ve vysokomolekulární polyetyléntereftalát s vláknitými molekulami.
- b) Výroba nedlouženého vlákna, při níž se z taveniny polyesteru, získané roztavením drtě nebo přímo z předchozí přípravy polykondenzátu, formují

tavným způsobem vlákna, která se navíjejí na cívky nebo ukládají ve volných smyčkách do prostorných košů.

- c) Úprava vlákna pro textilní zpracování, které spočívá v jeho dloužení za tepla a dalších operacích, jež se řídí podle toho, pro jaké textilní výrobky je určeno [23].



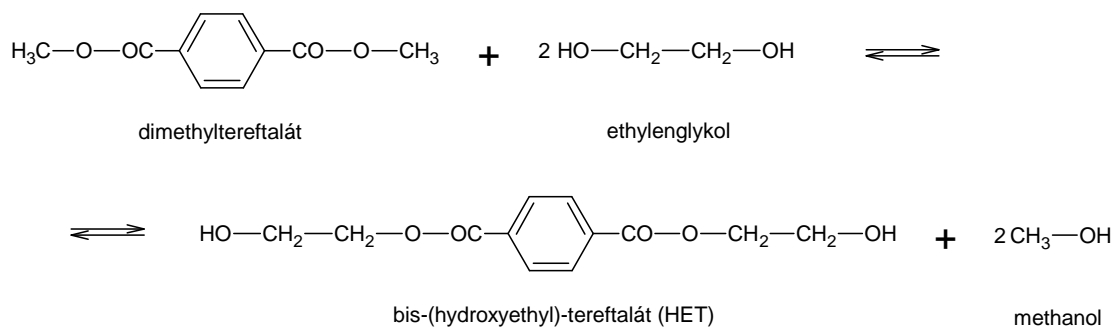
Obr. 4.3: Ethylenglykol



Obr. 4.4: Kyselina tereftalová

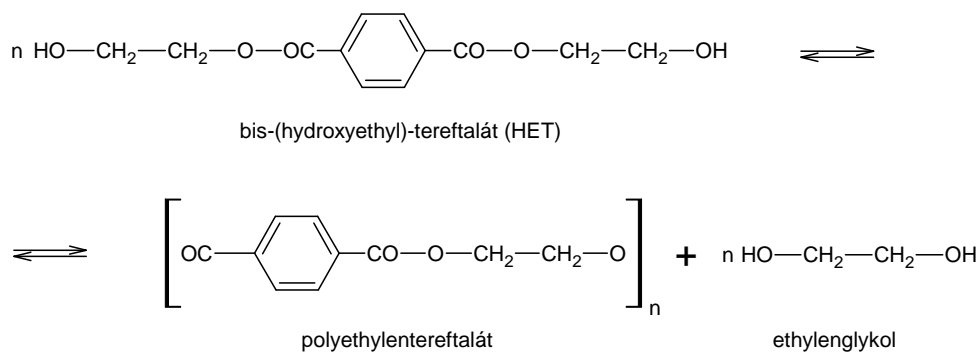
Příprava polykondenzátu je charakteristickým procesem pro polyesterová vlákna. Vláknotvorný polymer, který se v případě použití dimethyltereftalátu a ethylenglykolu jako základních surovin nazývá polyethyltereftalát, se nejčastěji připravuje dvěma za sebou následujícími chemickými reakcemi:

- reesterifikace (obr. 4.5), při které dochází k náhradě methanolu v molekule dimethyltereftalátu ethylenglykolem



Obr. 4.5: Postup výroby HET

- polykondenzace (obr. 4.6), ve které se původně malé molekuly HET spojují v dlouhé lineární molekuly polyethyltereftalátu při odštěpování molekul ethylenglykolu:



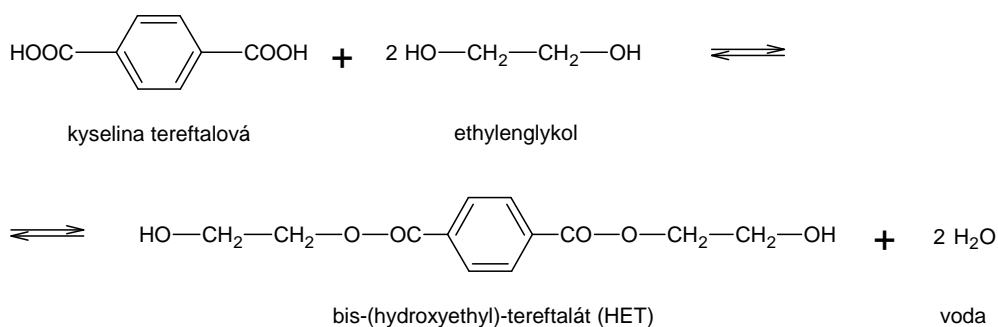
Obr. 4.6: Postup výroby polyethyltereftalátu

Tyto dvě reakce znázorňují chemický průběh přípravy polyethyltereftalátu, jak za sebou probíhají v klasickém výrobním postupu.

U klasického způsobu výroby zůstávají reagující složky při obou reakcích ve zvláštních nádobách a mění se teplota, obsah methanolu, stupeň polykondenzace apod.

U kontinuálního způsobu protéká reagující roztok složitou soustavou zařízení, při čemž v každém místě soustavy musí být při ustáleném průtoku stálá teplota, tlak, stupeň polykondenzace apod.

Vedle těchto dvou způsobů se využívá i další postup (obr. 4.7), při němž se jako výchozí suroviny používá místo dimethyltereftalátu kyselina tereftalová.



Obr. 4.7: Postup výroby HET jiným způsobem

Výhodou tohoto postupu je jednak možnost vypustit jednu z operací, a to esterifikaci kyseliny tereftalové methanolem, a jednak nepřítomnost methanolu při přípravě HET [23].

Polykondenzace se obvykle provádí při teplotě 270 až 280 °C. Teplota tavení PET je 260 °C a teplota chemického rozkladu činí asi 290 °C. Teplota, při které se polymer zvlákňuje, je nebezpečně blízká teplotě rozkladu, a proto se musí přesně dodržovat.

Při přípravě se pracuje pod dusíkem a tavenina se vytlačuje z reakční nádoby do vody, aby se získala polymerní drť. Drť se pere a suší při 120 až 140 °C tak, aby neobsahovala více než 0,01 % vody, protože větší obsah vody by způsobil hydrolytickou degradaci.

Protože PET má vyšší teplotu tavení, zahřívá se zvlákňovací rošt při zvlákňování PET z taveniny na 285 až 290 °C. Je tedy třeba dbát, aby tavenina polymeru zůstávala v těchto místech co nejkratší dobu.

Nejdůležitější operace při výrobě polyesterových stříží jsou dlužení, kadeření, fixace a řezání. Vlákna se dluží v poměru 1:4, někdy ve dvou stupních, na elektricky vyhřívaných hladkých kovových plotnách. Teplota žehlicích ploch se nastavuje na 140 až 150 °C, aby teplota vlastního vlákna při dlužení činila 100 až 110 °C.

Při přípravě polyesterového hedvábí musí dlužení probíhat při vyšší teplotě, která o 20 až 30 °C přesahuje teplotu skelného přechodu. Nevydloužená vlákna jsou tvrdá, tuhá a křehká, snadno se lámou. Dluží se různým způsobem, buď umístěním elektricky vyhřívané tyčinky mezi odtahovací a dlužící galetu, nebo tak, že se vlákno přivádí do styku s vyhřívanou leštěnou plochou nebo se několikrát vede mezi válci. Polyesterová vlákna se mohou vyrábět různě profilovaná [29].

4.6 Barvení polyesterových vláken

Výběr barviv pro barvení syntetických vláken je značně omezený, protože většina těchto vláken má značně odlišné vlastnosti. Vlákna jsou většinou hydrofobní, takže neobtnají buď vůbec, nebo jen omezeně. Syntetická vlákna mají většinou molekuly silně orientované a mezi orientovanými oblastmi jsou tak malé meziprostory, že barvivo do vlákna prakticky nepronikne.

Barvení polyesteru je obtížné. Příčinou je nepřítomnost reaktivních skupin ve vláknech, které by byly schopny vázat molekuly barviva. Na vybarvitelnost mají dále značný vliv strukturní změny vláken probíhající při dlužení a při fixaci vlákna, které orientací a krystalizací způsobují omezení prostoru pro průnik barviva dovnitř do vlákna. Proto se při barvení musí vytvořit podmínky pro zvýšení difúzní rychlosti barviv do vlákna.

Polyesterová vlákna lze barvit těmito způsoby:

- a) Pomocí tzv. přenašečů, jejichž roztokem se polyesterová vlákna před barvením nebo přímo při barvení zpracovávají za tepla. Přenašeče jsou schopny otevřít strukturu vláken, aby molekuly barviva mohly snadněji vniknout mezi molekuly polyesteru.
- b) Za použití barvicí lázně při vyšší teplotě (asi 120 °C). V tomto případě se musí pracovat ve zvláštních tlakových barvicích aparátech.
- c) Takzvaným termosolovým způsobem, při němž se barvivo nanese na povrch vláknů a upevní se v něm vyhřátím vláknů na teplotu 180 až 200 °C.

Pro barvení polyesteru mají největší význam vybraná disperzní barviva, která poskytují jasné a stálé odstíny. Z dalších skupin se mohou použít některá kypová barviva s menší molekulou. Omezený význam mají i indigosoly a pigmenty [23, 30].

4.6.1 Barvení polyesteru disperzními barvivy

Disperzní barviva jsou ve vodě nerozpustná, protože ve své molekule neobsahují skupiny způsobující rozpustnost. Dobře egalizují a výborně kryjí pruhovitost tkanin. Všechna disperzní barviva se vyznačují poměrně nízkou relativní molekulovou hmotností. Další charakteristikou vlastností těchto barviv je vysoká teplota tání jejich krystalů (nad 150 °C) rozemletých s dispergačním prostředkem na částice velikosti 0,5 až 2 mikrony. Disperzní barviva se vyznačují přítomností alifatických a aromatických skupin v molekule [30].

Disperzní barvivo je tedy ve vodě nerozpustné, a proto se polyesterová vlákna barví z velmi jemné disperze. Tvrzení, že barvivo je ve vodě nerozpustné, není přesné, protože disperzní barvivo musí mít částečnou (i když malou) rozpustnost ve vodě, která se zvýší teplotou barvení (100-130 °C). Toto rozpuštěné barvivo vytvoří na povrchu vlákna vrstvičku, ze které proniká difúzí do vlákna. Difúze je dostatečně rychlá při teplotách o 30-40 °C vyšších, než je teplota skelného přechodu (T_g) polymeru. U polyesteru je $T_g = 80-90$ °C. Za těchto podmínek, t.j. u polyesteru kolem 120-130 °C, jsou pohyby segmentů makromolekul natolik velké, že vznikají volné prostory mezi těmito segmenty, do kterých může barvivo pronikat v monomolekulární

nebo slabě asociované formě. Při poklesu teploty se pohyby segmentů sníží a molekuly barviva zůstávají v polymeru uzavřeny [31].

Disperzní barviva se můžou vázat na polyester těmito způsoby:

- a) vodíkovými můstky mezi aminoskupinami barviva a $-C=O$ skupinami vlákna
- b) dipólovým působením
- c) van der Waalsovými silami, které sice působí na malé vzdálenosti, ale v případě polyesterových vláken mohou působit na velikých plochách, uloží-li se benzenová jádra barviva paralelně s benzenovými jádry vlákna [30].

5 Polyamid

5.1 Historický vývoj

Vysokomolekulární sloučeniny, z nichž se vyrábějí polyamidová vlákna, byly objeveny koncem 19. století. Polyamidy s vyšším bodem tání, kterých již lze průmyslově využít, objevili Carothers a Hill v letech 1932 a 1933, když provedli úspěšné pokusy s kyselinou adipovou a hexamethyléndiaminem. Tento typ polyamidů byl nazván Nylon. Výroba polyamidu 6.6 byla do provozu uvedena v letech 1938 a 1939 v USA.

Carothers studoval polykondenzaci kyseliny ω -aminokapronové, ale protože kyselina nebyla dostatečně čistá, nepodařilo se mu připravit vláknatvorný polymer. Při této reakci vznikající ϵ -kapolaktam podle vyjádření Carotherse a Berchela nepolymeroval na polyamid ani při použití katalyzátorů. Toto tvrzení však bylo chybné.

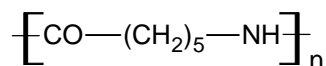
Zájem o nové syntetické polymery vedl i další chemiky ke studiu těchto reakcí a hmot. V Německu roku 1937 Paul Schlack postřehl a dokázal Carothersův omyl. Dokázal, že ϵ -kapolaktam je schopný polymerace, a tím otevřel cestu vývoji polyamidového vlákna (Perlonu) v Německu [32].

V roce 2005 se ve světě vyrobilo 3,8 milionů tun polyamidových vláken, převážně hedvábí, z toho cca. 0,6 mil. tun v Evropě. V ČR dosáhla výroba v roce 1989 více než 700 tun, údaje o produkci z posledních let nejsou známy [33].

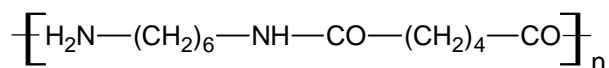
5.2 Chemické složení polyamidu

Polyamidy jsou vlákna z lineárních makromolekul, v jejichž řetězcích se opakují funkční amidové skupiny -CO-NH- [33].

Z mnoha druhů polyamidů se při výrobě vlákna v širším měřítku uplatnily jen dva. Výchozí materiál pro oba druhy je ropa, ze které vznikají chemickým procesem základní suroviny: u polyamidu typu 6 (obr. 5.1) kaprolaktam a u typu 66 (obr. 5.2), tzv. AH sůl.

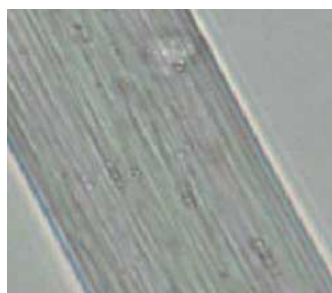


Obr. 5.1: Základní strukturální jednotka polyamidu 6



Obr. 5.2: Základní strukturní jednotka polyamidu 6.6

Řetězec polyamidů obsahuje vysoké procento pevných vazeb C-C, kdežto polární skupiny –CONH- umožňují vznik vodíkových můstků mezi sousedními úseky řetězců a velkou mezimolekulovou soudržností.



Obr. 5.3: Polyamid 6 [34]

Správné označení je polyamid x.y, kde x a y jsou čísla udávající počet uhlíků v základním řetězci. Tečkou se oddělují uhlíky dvou základních monomerů. Např. polyamid 6.6 apod.

5.3 Struktura polyamidu

Polyamidy patří do velké skupiny polymerů, které jsou schopné tvořit více či méně uspořádané oblasti. Stupeň tohoto uspořádání – krystalizace – není zpravidla nikdy úplný, takže vedle oblastí uspořádaných krystalických je v polymeru vždy určité množství neuspořádané amorfní fáze. U polyamidů se oblast krystalické fáze pohybuje většinou mezi 25 až 70%. Rozdělení vnitřní struktury polyamidů do dvou fází krystalické a amorfní je jenom schematické. Ve skutečnosti si musíme u obou případů představit několik přechodových stavů. Tak u fáze krystalické se můžeme setkat jak s dokonale trojrozměrným krystalickým uspořádáním, tak i s krystalickým trojrozměrným uspořádáním s nepravidelnostmi v mřížkové struktuře, také však s dvojrozměrným krystalickým uspořádáním nebo jen s uspořádáním jednorozměrným.

Amorfní fáze může zase zahrnovat kromě dokonale amorfního stavu,

odpovídajícího statisticky náhodně uspořádaným úsekům makromolekul, jak je tomu u přechlazených kapalin nebo skel, také rozmanitá uspořádání s různě velkým stupněm uspořádanosti na kratší nebo delší vzdálenosti [35].

5.4 Vlastnosti polyamidu

5.4.1 Geometrické vlastnosti

Příčný řez polyamidových vláken má tvar podle tvaru trysky, většinou je však pravidelný, kruhový. Zároveň s průřezem se hodnotí též průměr. Jemnost vláken lze libovolně regulovat při zvlákňování a dloužení. Jemnovláknité příze jsou měkčí a hřejivější, protože mají výhodnější objemové vlastnosti. Jsou však citlivější při výrobě i zpracování.

Z hlediska objemovosti syntetická vlákna, která mají kruhový průřez a rovný tvar, nemají příliš výhodné objemové vlastnosti. Z tohoto důvodu se zvětšuje objemnost polyamidových vláken jejich tvarováním a profilováním. Povrch polyamidových vláken je hladký. Zdrsňuje se speciálními úpravami.

5.4.2 Mechanické vlastnosti

Pevnost se hodnotí v tahu, ohybu a v oděru. Některá silně krystalická vlákna a vysoce orientovaná mají velkou pevnost v tahu a malou pevnost ve smyčce a uzlu. Pevnost za sucha se pohybuje od 3,6 do 7,5 cN/dtex a pevnost za mokra kolem 80 až 90 % pevnosti za sucha. Vyznačují se velkou pevností v tahu a vynikající odolností v odírání. Pevnost v oděru u polyamidových vláken závisí na pevných mezimolekulových vazbách a jejich příznivém poměru k elastické části řetězu. Tažnost PA 6 za sucha se pohybuje od 23 do 55 % a u PA 6.6 od 18 do 25 %.

Další významnou vlastností je elasticita. Velmi dobré elastické vlastnosti polyamidových vláken souvisí s množstvím amidových skupin, které způsobují příčnou pevnost.

Vysoká pevnost, dobré elastické vlastnosti a poměrně vysoká tažnost jsou u polyamidů dobře vyváženy. Podobně je tomu s pevností v oděru, ohybu a ve smyčce za sucha i za mokra. Souhrn těchto vlastností dává polyamidovým vláknům dobré užité vlastnosti [26, 32].

5.4.3 Chemické vlastnosti

Polyamidová vlákna jsou ze všech syntetických vláken nejcitlivější vůči chemikáliím. Jsou málo odolná vůči kyselinám, skupina $-CO-NH-$ se snadno kyselinami narušuje. Vedle koncentrovaných minerálních kyselin (i za nezvýšené teploty) poškozují polyamid i některé organické kyseliny, z nichž např. koncentrovaná kyselina mravenčí rozpouští polyamid v několika sekundách již za studena. Zředěné kyseliny polyamidové vlákna také poškozují, i když nedojde k rozpuštění, tento jev silně narůstá s teplotou [28].

Vůči alkáliím jsou polyamidy dosti odolné. Teprve za zvýšené teploty po delší době dochází k poškozování vláken.

Oxidační prostředky polyamid silně napadají za teploty vyšší než 50°C . Výrazně škodí i zředěné roztoky peroxidu vodíku a např. prací prášky s bělidly.

Z organických chemikálií nepoškozují polyamidy aldehydy, alkoholy, étery, estery, uhlovodíky, mýdla, smáčedla, tuky a oleje [32].

Jak již bylo uvedeno výše, běžně se vyskytují dva typy polyamidů: PA 6 a PA 6.6, které se liší svou chemickou odolností. PA 6.6 má vyšší krystalinitu, vyšší teplotu zesklňování i tání, tím je dána i jeho vyšší chemická odolnost. PA 6.6 se na rozdíl od PA 6 nerozpouští v DMF a lépe odolává působení kyselin a oxidovadel [28].

5.4.4 Termické vlastnosti

Za zvýšených teplot má polyamidové vlákno menší pevnost. Polyamidová vlákna se nejdříve taví, pak se vznítí tepelným rozkladem vznikající zplodiny.

PA 6:

- teplota měknutí: 170 °C
- teplota tání: 220 °C
- teplota žehlení: 160 °C
- hořlavost LOI: 20,1 %
- 170 °C na vzduchu – destrukce molekul
- 150 °C po 5 hod. mírně žlutne

PA 6.6:

- teplota měknutí: 235 °C
- teplota tání: 256 °C
- teplota žehlení: 180-200 °C
- 150 °C (6 hod.) žlutne – klesá pevnost [26]

5.4.5 Další vlastnosti

Navlhavost je u polyamidových vláken poměrně malá. Schopnost přijímat vlhkost je tím větší, čím větší je počet amidových skupin ve vlákně a čím méně je jich vázáno vodíkovými můstky v krystalické části vlákna. Pro mnoho způsobů použití je malá schopnost přijímat vodu vhodná, jinde je na závadu [32].

Vlivem světla dochází ke žloutnutí PA, rychle se snižuje pevnost a tažnost. Na tomto procesu se podílí vliv kyslíku, který proces urychluje. První poklesy pevnosti vlivem světla zářivek lze zaznamenat dokonce již po desítkách hodin [28].

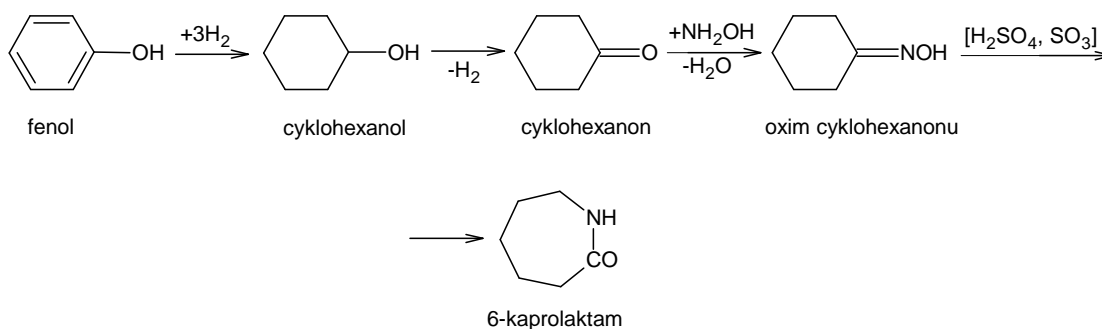
Ostatní povětrnostní vlivy nemají podstatný vliv na vlastnosti polyamidových vláken.

5.5 Výroba polyamidu

5.5.1 Vlákna z polyamidu 6

Vlákna z polyamidu 6 lze připravovat částečně rozdílnými technologickými postupy, jejichž základní principy jsou však stejné. Základní surovinou je vždy kaprolaktam. Technologický postup je v podstatě buď přerušovaný, nebo plynulý [29].

Příprava kaprolaktamu k polymeraci je většinou vždy stejná. Přestože je možno kaprolaktam vyrobit několika postupy, uplatnil se z nich především postup vycházející z fenolu (obr. 5.4):



Obr. 5.4: Postup výroby 6-kaprolaktamu [35]

Nejjednodušší způsob výroby PA 6 je způsob kontinuální, při němž na polymeraci kaprolaktamu plynule navazuje zvláknění a dlužení získaného vlákna, bez přípravy polyamidové drtě. Tento technologický postup měl všechny technologické a ekonomické výhody zkontinualizovaného procesu. Vyskytly se však různé nedostatky, které bránily uplatnění tohoto nadějného způsobu i při výrobě vláken lépe odpovídajících požadavkům textilního zpracování.

Dalším způsobem výroby PA 6 je klasický nepřetržitý způsob, který je nejvíce rozšířen. Vychází z přetržité polymerace kaprolaktamu v autoklávu. Tavenina kaprolaktamu se zahřívá na 90 až 95 °C pod dusíkem a filtruje se stojatými svíчковými filtry. Autoklávy pro polymeraci kaprolaktamu, mající obsah 2000 l, se vyhřívají dowthermem na teplotu 230 až 240 °C a polymerace probíhá při zvýšeném tlaku. Dowtherm je tuhý nejedovatý roztok 73,5 % difenyletheru a 26,5 % bifenyly s bodem tání 13 °C a bodem varu 258 °C. Jeden cyklus polymerace trvá asi 14 hodin. Z autoklávu se dusíkem vytlačuje polymer ve formě pásku nebo tlustého drátu do vody

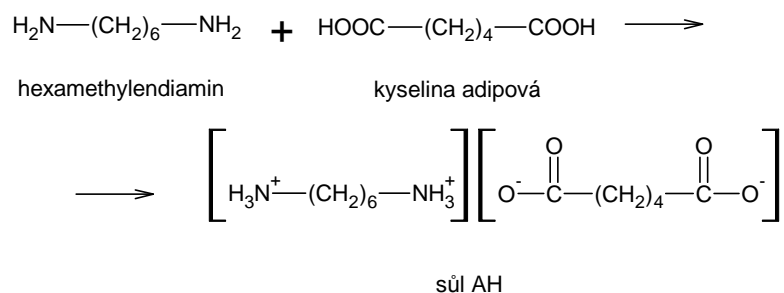
a v této formě se seká rotujícím nožem na drť. Aby se zmenšil obsah monomeru, pere se drť 3krát až 4krát horkou vodou a nakonec vodou studenou.

Polymerní drť se roztavuje na vyhřívaném roštu zvláknovací hlavy, z něhož tavenina kape do poměrně malé jímky. Když se jímka pod roštem zaplaví taveninou, přeruší se tím styk tuhého polymeru s vyhřívaným roštem a tavení ustane. Celý tento proces probíhá v dusíkové atmosféře a je vyhříván dowthermem.

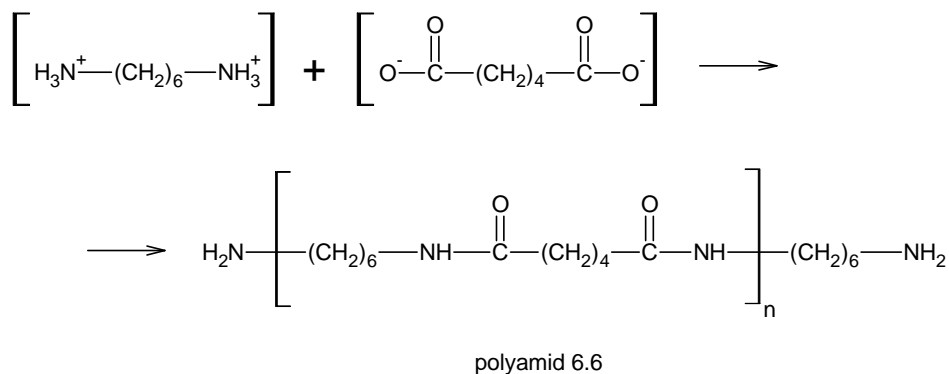
Tavenina se zvláknuje do zvláknovací šachty. Nedloužené vlákno prochází klimatizovanou šachtou s přívodem vzduchu k šlichtovacímu válečku a k odvalovacímu zařízení. Vlákna se orientují na dloužícím a skacím stroji mezi dloužícím kolíkem a galetou [29].

5.5.2 Vlákna z polyamidu 6.6

Polyamid 6.6 se připravuje polykondenzací z kyseliny adipové a hexamethylendiaminu podle tohoto schématu (obr. 5.5 a 5.6).



Obr. 5.5: Příprava soli AH



Obr. 5.6: Polykondenzace

Tvorba soli AH je žádoucí pro zajištění reagujících složek v ekvimolárním množství. Umožňuje získávat polymer o vyšším polymeračním stupni tím, že zabraňuje předčasné terminaci, k níž dochází při přebytku koncových karboxylových skupin nebo aminoskupin. Sůl AH v 50%ním až 60%ním vodném roztoku, obsahující asi 0,5 % kyseliny octové jako stabilizátoru viskozity, se zahřívá v autoklávu pod dusíkem, aby se zabránilo zabarvení polymeru oxidací. Pracuje se za tlaku. Přbytek vody se odstraní odpařením. Tavenina je poměrně málo stálá k vysokým teplotám, a proto se musí rychle zpracovat [29].

5.6 Barvení polyamidových vláken

Tato vlákna se barví mnohem snadněji než ostatní vlákna ze syntetických polymerů, protože obsahují ve své molekule kyselé a zásadité skupiny, takže mají amfoterní charakter. Barvitelnost polyamidových vláken určují především koncové $-NH_2$, $-COOH$ skupiny a dále koncové amidoskupiny ($-NH-CO$).

Polyamidová vlákna lze prakticky barvit všemi skupinami barviv. Vyhovují hlavně disperzní, vybraná kyselá a kovokomplexní dispergovatelná barviva. Na koncové amino- a amidoskupiny se vážou silně kyselá barviva a na karboxylové skupiny pak barviva bazická. Disperzní barviva se vážou vodíkovými můstky na střední $-NH-$ a $-COOH$ skupiny. Stejně se vážou slabě kyselá a substantivní barviva. Vedle vodíkových můstků se uplatňuje také adsorpce, van der Waalsovy síly a rozpuštění adsorbovaného barviva ve hmotě vlákna jako v tuhém rozpouštědle. Způsoby vazby mezi barvivem a vláknem se obvykle vzájemně prolínají [30].

5.6.1 Barvení polyamidu disperzními barvivy

Disperzní barviva se vážou s polyamidem i dalšími hydrofobními vlákny van der Waalsovými vazbami. Ve vodní lázni jsou rozpustná nepatrně, proto se musí co nejjemněji dispergovat pomocí dispergačních TPP. Už samotné obchodní barvivo obsahuje dispergátor, kromě toho je nutné jej přidávat do lázně, která je neutrální nebo slabě kyselá.

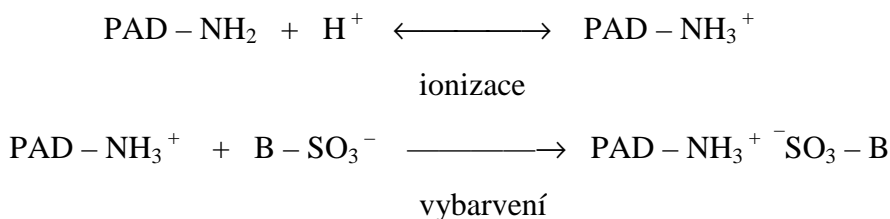
Statistické rozmístění příslušných četných vazných míst vlákna je mnohem pravidelnější, takže disperzní barviva kryjí mnohem lépe pruhovitost polyamidových

materiálů než barviva kyselá. Mokrě stálosti vybarvení jsou však nižší. S tím souvisí i výhoda - lepší egalizace.

Nízká pevnost vazeb disperzních barviv s vláknem se může projevit i nežádoucím vyextrahováním barviva z nitra vlákna na jeho povrch vlivem nevhodné aviváže, minerálního oleje, neionogenního TPP. Toto nežádoucí migrování barviva na povrch vlákna se exponenciálně urychluje teplotou, převážně k němu dochází při termofixaci nebo paření, proto se nazývá termomigrace. Projeví se silně zhoršenými stálostmi v otěru atd. [36].

5.6.2 Barvení polyamidu kyselými barvivy

Kyselá barviva jsou sodné soli barevných sulfokyselin, schematicky $B-SO_3^-Na^+$, kde B představuje velký chromogen. Aniont barviva se iontově váže na ionizovanou aminoskupinu vlákna, která vzniká přijmutím protonu H^+ kyseliny .



Vazba přes aminoskupiny vlákna $H-[NH-(CH_2)_5-CO]_n-OH$ má za následek, že kyselá barviva odhalují kolísání polymeračního stupně i změny nadmolekulární struktury polyamidu, tím vzniká pruhovité vybarvení [36].

Vybraná kyselá barviva vybarvují polyamidy na jasné a čisté odstíny. Při výběru barviv se musí volit odstínově čistá barviva a taková, která dávají při barvení vysoký bod nasycení. Bodem nasycení se nazývá množství barviva přijatého vláknem. Nevýhodou je jejich vzájemné blokování.

Blokování je jev, který někdy nastává při barvení kombinací dvou nebo více nevhodných barviv a projevuje se tím, že některému barvivu brání ostatní barviva přítomná v barvicí lázni v natahování na vlákno. Blokování je způsobeno rozdílným počtem sulfoskupin použitých barviv. Polyamid se nejlépe barví barvivy s jednou sulfoskupinou.

Blokování se dá vysvětlit tak, že monosulfobarvivo se váže svou jedinou sulfoskupinou na kteroukoliv koncovou aminoskupinu polyamidu. Disulfobarvivo se musí vázat oběma sulfoskupinami na dvě koncové aminoskupiny různých molekul polyamidu a má tedy mnohem méně příležitosti k vazbě než monosulfobarvivo. Nevázaná sulfoskupina svým elektrickým nábojem způsobuje, že barvivo snadno přechází do roztoku a je také vytěšňováno monosulfobarvivem, jehož molekula se může snadno spojit s koncovou skupinou polyamidu na elektricky neutrální, těžko rozpustný celek [30].

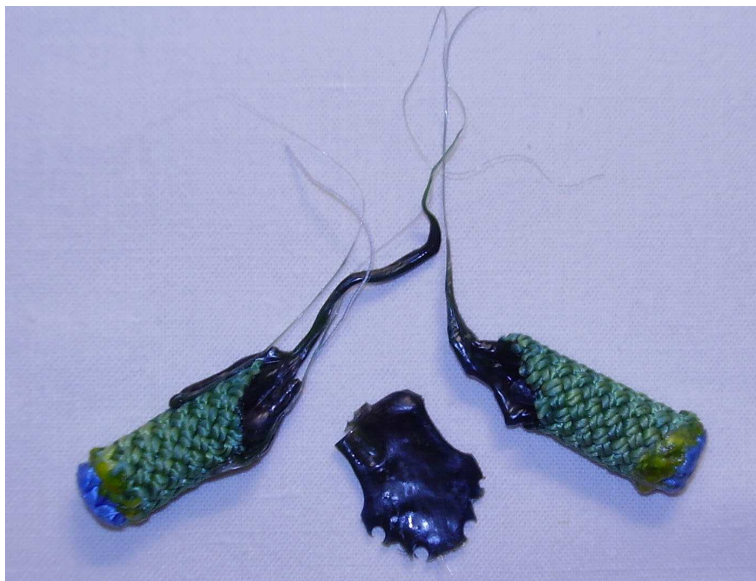
8 Seznam použité literatury:

- [1] <http://www.otevrena-veda.cz/ov/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/112.pdf> (16.1.2008)
- [2] http://www.chemagazin.cz/Texty/CHXV_1_c11.pdf (16.1.2008)
- [3] <http://www.3pod.cz/131-Vyuziti-mikrovlneho-vysouseni-v-textilnim-prumyslu.html> (23.1.2008)
- [4] Dvořáková D.: Možnosti použití vysokofrekvenčního elektromagnetického pole v textilní technologii, diplomová práce, KEL, FM, FT, TUL, Liberec 2003
- [5] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_spektrum (8.2.2008)
- [6] <http://objekty.astro.cz/nase/135/> (8.2.2008)
- [7] http://if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/elmg_zareni.doc (7.2.2008)
- [8] http://www.biosystems.cz/vedlejsi.php?typ=mikrovlny&podtyp=MV_teorie&text=MV_podrobneji (23.2.2008)
- [9] http://www.labo.cz/mft/rad_pasma.htm (8.2.2008)
- [10] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=68 (11.3.2008)
- [11] http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/11_elmag/11_elmag.htm (7.2.2008)
- [12] <http://mfweb.wz.cz/fyzika/162.htm> (7.2.2008)
- [13] Turek, B.: Experimentální pracoviště pro ověřování vlivu vysokofrekvenčního pole na textilní materiály, DP, TUL, Liberec 2003.
- [14] <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/5.2.html#zpet4> (24.2.2008)
- [15] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=51 (11.3.2008)
- [16] <http://www.anton-paar.com/ap/apinternet/html/default/cmse-698dgg.en.0.jsp> (26.2.2008)
- [17] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=91 (7.3.2008)
- [18] <http://www.vscht.cz/sch/www321/7T.html> (10.2.2008)
- [19] <http://www.anton-paar.com/ap/apinternet/html/default/cmse-699cg3.en.0.jsp> (26.2.2008)
- [20] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=37 (10.2.2008)
- [21] http://www.otevrena-veda.cz/ov/index.php?p=proc_se_zabyvame&site=icpf (7.3.2008)
- [22] http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyesterová_vlákna (3.3.2008)
- [23] Miklas, Z., Vaváček, M.: Polyesterová vlákna, SNTL, Praha 1966
- [24] Kryštůfek, J.: Polyesterová vlákna – barvitelnost [přednáška], TUL, Liberec 2006
- [25] Militký, J., Vaníček, J., Kryštůfek, J., Hartych, V.: Modifikovaná

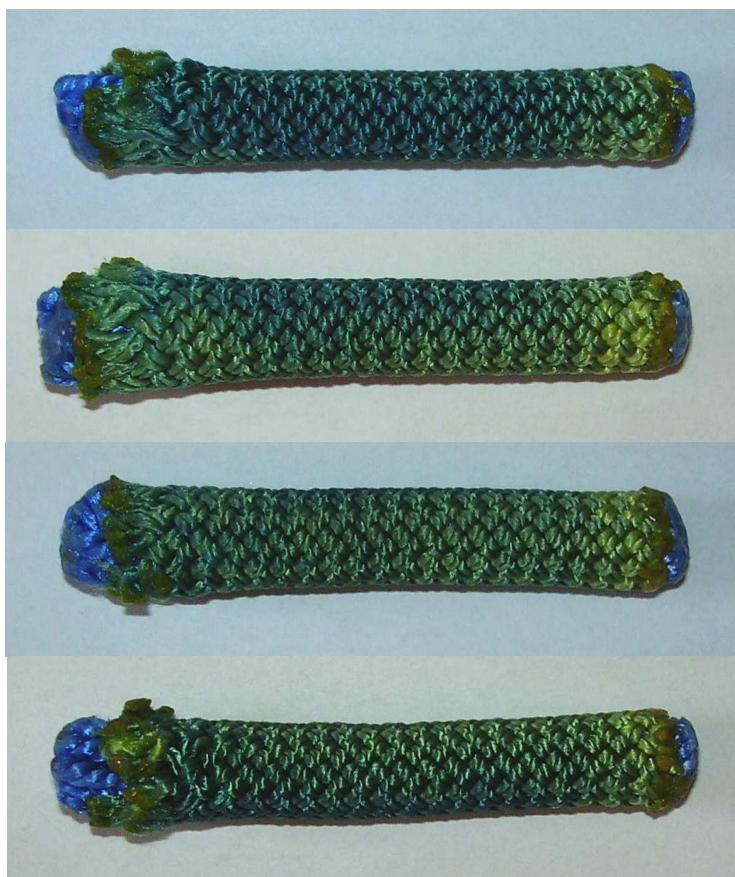
- polyesterová vlákna, SNTL, Praha 1984
- [26] Militký, J.: Textilní vlákna, klasická a speciální, TUL, Liberec 2002
- [27] Lacko, V.: Polyesterové vlákna, SVTL, Bratislava 1959
- [28] Wiener, J., Kryštůfek, J., Průšová, M.: Chemicko-textilní rozbory. Přednášky, TUL, Liberec 2007
- [29] Kebl, F.: Technologie chemických vláken, SNTL, Praha 1977
- [30] Šrámek, J.: Chemická technologie zušlechťování III, SNTL, Praha 1974
- [31] <http://splhej.wz.cz/referat/chemie/28/Barviva/> (4.3.2008)
- [32] Chalupský, J., Blažek, J.: Polyamidová vlákna, SNTL, Praha 1962
- [33] http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyamidová_vlákna (20.3.2008)
- [34] Militký, J.: Syntetická vlákna [přednáška], TUL, Liberec 2006
- [35] Veselý, R., Sochor, M. a kol.: Polyamidy, jejich chemie, výroba a použití, SNTL, Praha 1963
- [36] Kryštůfek, J., Čandová, J.: Barvení textilií [cvičení], TUL, Liberec 2005
- [37] Wiener, J.: Mikrovlnné sušení kobercové textilie, TUL, Liberec 2007
- [38] Vašíčková, Z.: Ověření technologie mikrovlnného ohřevu plošných útvarů pomocí stojaté vlny, diplomová práce, TUL, Liberec 2007
- [39] <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/podr1.htm> (10.2.2008)
- [40] <http://www.pandatron.info/elektronika2/clanek.php?rubrika=te&clanek=32&magnetron> (10.2.2008)
- [41] <http://www.gallawa.com/microtech/magnetron.html> (12.3.2008)
- [42] <http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx08.en.html> (18.3.2008)
- [43] Vrba, J.: Úvod do mikrovlnné techniky, ČVUT, Praha 2003
- [44] Truhlář, M.; Novák, P.: Mikrovlnný ohřev plošných útvarů pomocí stojaté vlny ve vlnovodu, FM, TUL, Liberec 2006
- [45] Žák O. : Vlnovodový aplikátor pro vysoušení textilních materiálů, Diplomová práce, ČVUT, Praha 2005
- [46] Truhlář, M.: , Diplomová práce, FM, TUL , Liberec 2007
- [47] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Glycerol> (20.3.2008)
- [48] http://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_octová (6.4.2008)
- [49] <http://www.viking-rtv.cz/lanas.htm> (14.4.2008)
- [50] Tomková, B.: Clutex – Klastř technické textilie. Co dokáže textil II. Inovace horolezeckých lan pro lezení na umělých stěnách, TUL, FT 2008.
- [51] <http://metodika.sakal.stredozem.cz/lano/horolano.htm> (15.4.2008)

Přichycení vzorku na skleněnou tyčinku pomocí silikonové

Barvení polyamidového lana:



Obr.C.1: Roztavený vzorek polyamidového lana vlivem působení mikrovlnného pole



Obr.C.2: Nerovnoměrné obarvení polyamidového lana