



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## SUŠENÍ A PŘEDEHŘEV V ZALÉVACÍM PROCESU EPOXIDŮ

DRYING AND PREHEATING IN POTTING PROCESS OF EPOXIDES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Matoušová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

BRNO 2017



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Klára Matoušová

**ID:** 173698

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Sušení a předehřev v zalévacím procesu epoxidů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte základní složení, vlastnosti a mechanismy při vytvrzování epoxidů. Seznamte se se současným stavem používané technologie s poukázáním na možnosti optimálnějšího řešení z pohledu dosažení lepších výsledků vysušení.

Navrhněte možnosti sušení funkčních částí před zalitím do epoxidu předsušením materiálů. Stanovte nutné podmínky pro vysušení, nejvhodnější metody pro vysušení, případně náhradu používaných materiálů za materiály, které se lépe vysouší.

Navrhněte možnosti optimálního řešení předehřevu pro dosažení požadované teploty funkčních částí a vysušení použitých materiálů před zalitím do epoxidu (teploty cca 90 a 130°C).

Sepište zprávu o dosažených výsledcích.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

**Konzultant:** Ing. Pavel Ujezdský

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vadami v epoxidem zalévaných přístrojových transformátorech. Jelikož působení vlivů, způsobující nekvalitu, je velmi rozsáhlé, je největší důraz kladen na vliv vlhkosti. V práci je popsána technologie výroby včetně používaných metod a materiálů. Dále složení epoxidových pryskyřic a mechanismy při jejich vytvrzování. Rovněž je zahrnut popis vlhkosti, jejích nežádoucích vlivů a možnost její odstranění sušením. V rámci experimentální části bylo realizováno měření vlhkosti používaných bandážovacích materiálů. Na základě výsledků praktické části byla zhodnocena nejvhodnější doba sušení, vhodnost materiálů z pohledu vysoušení a ve 2 případech byly stanoveny náhrady současných obtížně sušených vzorků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Přístrojové transformátory, epoxid, ovinové materiály, vady, vlhkost, sušení, ABB s.r.o.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis is dealing with the defects in epoxy resin flooded transformer devices. Since these can be damaged severely in terms of quality by numerous forces, the main focus is dedicated to the impact of moisture. The thesis describes the manufacturing technology including the methods applied and materials used. It further encompasses the composition of epoxy resin and the mechanisms used for their hardening processes. Additionally, the description of the moisture, the impact of adverse forces and the method of their elimination using drying is presented. In the experimental part of the paper, a moisture of the banding materials was measured. On the basis of the results acquired, the paper reaches a conclusion on the ideal time frame of drying, the sufficiency of materials in terms of drying and in two cases two substitutes for contemporary uneasily dryable samples were considered.

## **KEYWORDS**

Instrument transformer, banding materials, epoxide, humidity, drying, defects, ABB s.r.o.

MATOUŠOVÁ, K. Sušení a přehřev v zalévacím procesu epoxidů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 44 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „**Sušení a předeřev v zalévacím procesu epoxidů**“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. a také odbornému konzultantovi z firmy ABB s.r.o. Ing. Pavlovi Oujezdskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Přístrojové transformátory</b>	<b>9</b>
1.1 Elektrická pevnost.....	10
1.2 Používané technologie ve firmě ABB s.r.o. ....	11
1.2.1 Vakuové lití.....	11
1.2.2 Tlakové lití.....	11
<b>2 Materiály izolačního systému</b>	<b>12</b>
2.1 Materiály pro bandážování přístrojových transformátorů.....	12
2.2 Izolační materiály přístrojových transformátorů .....	12
2.3 Epoxidová pryskyřice.....	12
2.3.1 Složky epoxidové pryskyřice .....	13
2.4 Vytvrzování epoxidů .....	13
2.4.1 Metody vytvrzování .....	14
<b>3 Vady a degradace</b>	<b>15</b>
3.1 Vady ve výrobcích .....	15
3.1.1 Vady vzniklé chybami v technologickém procesu.....	15
3.2 Degradace polymerů .....	16
3.2.1 Vliv teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic.....	16
3.2.2 Vliv vlhkosti na vlastnosti epoxidových pryskyřic .....	16
<b>4 Vlhkost</b>	<b>17</b>
4.1 Vlhkost vzduchu .....	17
4.2 Navlhavost .....	18
4.3 Absorpce vlhkosti.....	18
4.4 Oblasti možného vniku vlhkosti do používaných materiálů .....	18
<b>5 Sušení</b>	<b>19</b>
5.1 Způsoby odvlhčování .....	19
5.2 Odvlhčování vzduchu.....	19
5.3 Přehled sušáren .....	19
5.3.1 Konvekční sušárny .....	20
5.3.2 Kontaktní sušárny.....	20

5.3.3	Radiační sušárny .....	20
<b>6</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>21</b>
6.1	Stanovení vlhkosti ve vrstvených vzorcích prokladů a bandáží .....	21
6.1.1	Postup měření.....	21
6.1.2	Měřené vzorky .....	21
6.1.3	Naměřené hodnoty .....	22
6.1.4	Vynesené grafické závislosti.....	22
6.2	Měření možných náhradních materiálů .....	28
6.2.1	Postup měření.....	28
6.2.2	Měřené vzorky .....	28
6.2.3	Naměřené hodnoty .....	29
6.2.4	Vynesené grafické závislosti.....	29
6.3	Hmotnostní vlhkost .....	30
6.3.1	Vynesené grafické závislosti.....	31
6.4	Přístroje použité při realizaci praktické části.....	34
6.4.1	Váha METTLER-TOLEDO AT200 .....	34
6.4.2	Vakuový skleněný exsikátor .....	35
6.4.3	Sušárna VENTICELL BMT typ standard 55.....	35
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>
	<b>Literatura</b>	<b>39</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam grafů</b>	<b>44</b>

# ÚVOD

V provozech zaměřených na výrobu elektrotechnických zařízení je nutné zajistit spolehlivost a kvalitu výrobků. Tyto požadavky mohou být ohroženy nesprávnou technologií výroby, kvalitou či vlastnostmi použitých látek a materiálů. Kvalita a spolehlivost produktů výrazně ovlivňuje konkurenceschopnost na trhu a také snižuje náklady spojené s hrazenými opravami v záruční době.

Firma ABB s.r.o. je mezinárodní firma a také přední dodavatel elektrotechnických výrobků, jako jsou transformátory, rozvaděče či řídicí systémy. Kvalita těchto produktů je mnohdy stěžejní pro spolehlivý přenos elektrické energie. Brněnská pobočka této firmy se zabývá výrobou nejen rozvaděčů a senzorů vysokého napětí, ale i přístrojových transformátorů.

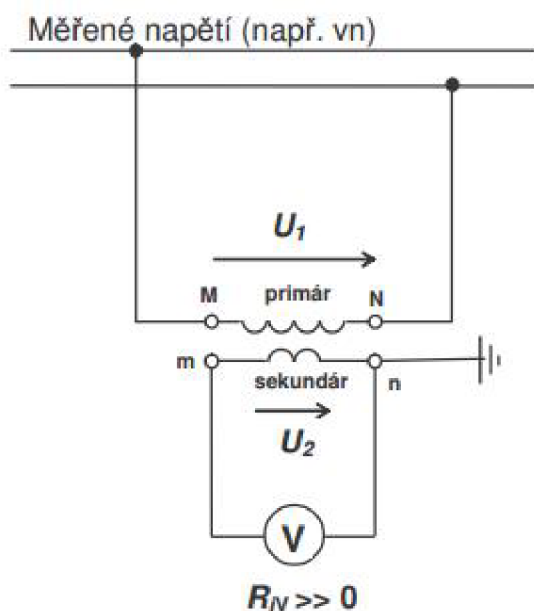
Cílem práce je zvýšení kvality přístrojových transformátorů. Během procesu zalévání mohou v epoxidem zalévaném transformátoru ulpět vzduchové bubliny, které následně způsobují nežádoucí jevy, např. částečné výboje. Tyto bubliny mohou být způsobeny zejména vlhkostí obsaženou v bandážovacích materiálech. Předmětem práce bude určit vlhkost obsaženou v materiálech a vhodnou dobu pro jejich vysušení, případně doporučit náhradu nevhodných materiálů. Výsledkem práce by mohlo být také doporučení případného zkrácení doby vysušování, ukáží-li experimenty takovou možnost, resp. umožní-li takovou možnost náhrady nevhodných materiálů. Výsledkem práce by mohly být i energetické a časové úspory.

# 1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Společnost ABB s.r.o. se v brněnské pobočce zabývá výrobou přístrojových transformátorů proudu a napětí. Přístrojové transformátory jsou stěžejními prvky přenosových a distribučních soustav. Tyto transformátory slouží ke změně hodnot velkých střídavých napětí a velkých střídavých proudů na hodnoty vhodné pro měřicí přístroje za současného galvanického oddělení měřeného obvodu a obvodu měřicího přístroje.

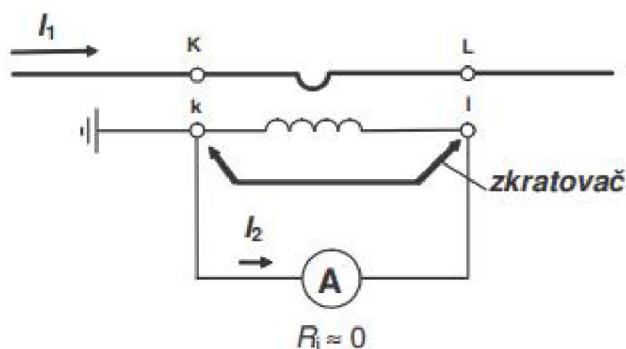
Základními částmi transformátoru jsou jádro, vinutí a izolační systém. Přístrojový transformátor se skládá z primární a sekundární cívky na ocelovém jádře, které je pro obě cívky společné. Princip fungování transformátorů je založen na fyzikálním jevu elektromagnetické indukce. Primární vinutí je připojeno ke zdroji střídavého proudu, který v jádře generuje proměnné magnetické pole o indukčním toku  $\Phi_1$ . Sekundární vinutí napájí obvody měřicích přístrojů.

U měřicího transformátoru napětí je primární vinutí paralelně zapojeno k měřenému obvodu. Sekundární vinutí je zapojeno k voltmetru s velkým vnitřním odporem, tzn., že přístrojový transformátor napětí pracuje stejně jako při stavu naprázdno. Schéma zapojení je na Obr. 1. [1]



Obr. 1: Schéma zapojení měřicího transformátoru napětí [1]

V případě přístrojového transformátoru proudu je primární vinutí v sérii s měřeným obvodem a sekundární vinutí je připojeno k ampérmetru s co nejmenším odporem, takže měřicí transformátor proudu pracuje ve stavu nakrátko. Schéma zapojení je na Obr. 2.



Obr. 2: Schéma zapojení přístrojového transformátoru proudu [1]

Oba typy přístrojového transformátoru lze využít i pro měření činného výkonu wattmetrem.

## 1.1 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je důležitou veličinou pro elektrotechnické materiály a materiálové soustavy v technické praxi. Jde o fyzikální pojem popisující schopnost materiálů odolat elektrickému poli.

Elektrické pole způsobuje polarizaci dielektrika a při zvětšení intenzity elektrického pole se zvětšuje koncentrace volných nábojů i jejich pohyblivost. V případě zvyšování intenzity elektrického pole dojde k tzv. průrazu dielektrika. Dielektrikum ztratí svoje elektroizolační vlastnosti a vytvoří se v něm vodivý kanálek, jímž mohou procházet značné proudy. Průraz dielektrika označuje výboj vzniklý v pevných materiálech. V takovýchto materiálech způsobí průraz nevratné změny struktury. U plynů a kapalin nemluvíme o průrazu, avšak o přeskočení. Elektroizolační vlastnosti se odezněním přeskočení obnoví.

Elektrická pevnost v homogenním elektrickém poli je popsána vztahem

$$E_p = \frac{U_p}{h} \quad (1.1)$$

kde  $U_p$  je velikost průrazného napětí a  $h$  je hodnota tloušťky izolantu v místě průrazu nebo přeskočení. Základní jednotkou elektrické pevnosti je V/m.

Průrazné napětí je nejnižší hodnota napětí, při kterém dojde k elektrickému průrazu dielektrika, čímž látka ztratí své izolační schopnosti. Velikost tohoto napětí závisí na rychlosti růstu napětí na elektrodách a také na vzájemném uspořádání izolátoru a elektrod, na které je přiloženo elektrické pole. [2]

Teoretická hodnota elektrické pevnosti v ideálním dielektriku nikdy nebude rovna reálné hodnotě, jelikož dielektrikum vždy obsahuje drobné defekty, které pevnost snižují. Elektrická pevnost je ovlivněna nejen tloušťkou izolantu, ale také teplotou, homogenitou či nehomogenitou elektrického pole, druhem elektrického pole, kmitočty, dobou působení pole a rychlostí zvyšování napětí při zkoušce. Např. čím menší napětí působí na izolant, tím větší časový úsek uplyne do momentu průrazu.

S cílem zvýšení elektrické pevnosti se při výrobě přístrojových transformátorů používají vícenásobné tenké vrstvy dielektrik, jelikož elektrická pevnost tenkých vrstev materiálu je vyšší než při použití silnějších vrstev.

Důležitým parametrem je také pevnost mechanická, kterou mohou negativně ovlivnit fyzikální a chemické reakce na hranici jednotlivých složek kompozitu. Tyto reakce jsou nežádoucí a mohou nastat při používání či při výrobě daného materiálu.

## **1.2 Používané technologie ve firmě ABB s.r.o.**

Ve firmě ABB s.r.o. jsou proudové i napěťové přístrojové transformátory zalévány epoxidovou pryskyřicí dvěma možnými technologiemi – tlakovým nebo vakuovým litím.

### **1.2.1 Vakuové lití**

V případě technologie vakuového lití se primární i sekundární vinutí upevní do kompletní formy. Takto připravené transformátory jsou předehřívány v tunelu při teplotě 90 °C po dobu 6 hodin. Následně se zalévají ve vakuové komoře (10 min) a vytvrzují se přibližně 2 hodiny. Po vytvrzení následuje vyjmutí z formy a poté se transformátory převezou do dotvrzovacího tunelu rozděleného na 6 sekcí s teplotami 90 °C, 110 °C, 110 °C, 110 °C, 110 °C a poslední sekce je vypnutá. V této části procesu se epoxid stabilizuje po dobu cca 16 hodin. [3]

### **1.2.2 Tlakové lití**

Modernější a efektivnější technologií pro výrobu přístrojových proudových a napěťových transformátorů je proces tlakového odlévání neboli metoda APG (Automatic pressure gelation).

Jde o modifikaci reakčního vstřikování, zkráceně RIM. V porovnání s RIM je pro metodu APG potřeba nižšího tlaku (do 0,3 MPa) a stěny výrobků mohou být řádově vyšší, což ale prodlužuje dobu výroby. V procesu tlakového lití se využívá nekompletní formy. Forma s funkčními částmi se předehřívá po dobu 6 hodin. Následné lití probíhá v šikmé poloze transformátoru umístěného mezi topné desky tlakového stroje a do formy je tlačén epoxid z míchacího zařízení. V tlakovém stroji přibližně za hodinu dojde k vytvrzení odlitku. Nyní má firma ABB s.r.o. i tlakové licí stroje, u kterých je možno použít kombinace tlakového lití pod vakuem. Pokračující proces je shodný jako u vakuového lití. [4]

## 2 MATERIÁLY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU

Hlavními ukazateli izolačního systému jsou průrazné napětí, teplotní třída materiálu, permitivita, ztrátový činitel, vnější a vnitřní rezistivita. Velkou roli hrají klimatické podmínky jako je vlhkost, teplota, sluneční záření a také chemické vlivy.

### 2.1 Materiály pro bandážování přístrojových transformátorů

- Bavlněné tkanice.
- Polovodivé pásy na bázi krepového papíru.
- Polovodivé pásy na bázi fleecu.
- Mikroporézní pryž (neopren, epdm).
- Impregnované papíry.

### 2.2 Izolační materiály přístrojových transformátorů

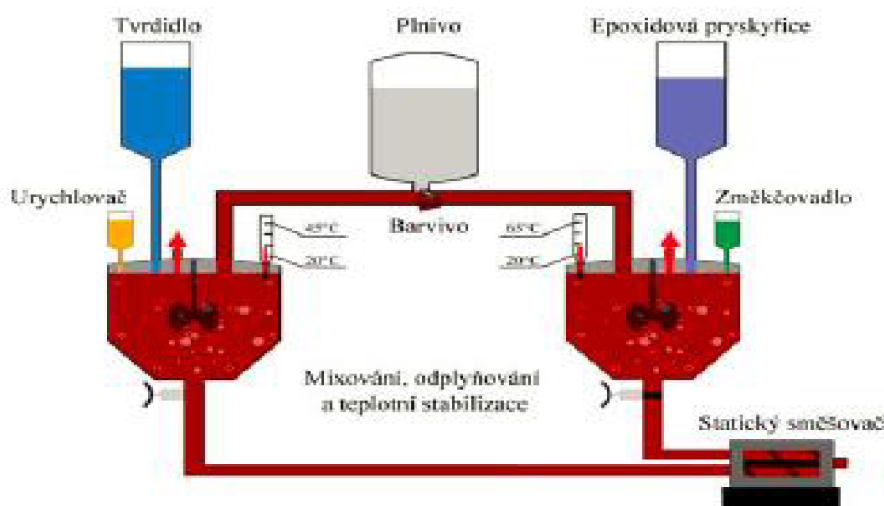
- Izolační lamináty (DMD, Trivolton H, Trivolton HP).
- Kartitové trubky.
- Epoxidová pryskyřice.

### 2.3 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice je polymerní látka, konkrétně reaktoplast. Reaktoplasty vytvářejí prostorově zesílené struktury vlivem působení tepla, záření, nebo síťovacích činidel. Po vytvrzení se reaktoplasty stávají netavitelnými a nerozpustnými. Výroba epoxidových pryskyřic probíhá už přes 50 let a našly mnoho využití od lepidel a nátěrů, přes povrchové úpravy, až po aplikace v lodním, automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. [5]

V elektrotechnické výrobě jsou epoxidové pryskyřice hojně využívány jako elektroizolační zalévací hmoty skládající se z několika hlavních částí, které se pro chtěné vlastnosti musí míchat v přesně určeném poměru. Schéma přípravy licí směsi je na Obr. 3.





Obr. 3: Příprava epoxidové licí hmoty [5]

### 2.3.1 Složky epoxidové pryskyřice

**EPOXID** – základní složka.

**TVRDILO** je nutnou součástí polymerní reakce, díky které se struktura pryskyřice zesiluje. Dle toho, zda se tvrdidla stanou, či nestanou součástí této sítě, je dělíme na polyadiční (polyfenoly, anhydridy, polykyseliny, polyamidy, polyaminy...) a polymerační (diethylentriamin, dipropylentriamin). [6]

**PLNIVO** je aditivum, které ovlivňuje nejen mechanické, teplotní, elektrické, povrchové vlastnosti, ale i životnost a cenu. Jako plnivo se využívá většinou křemičitý písek.

**URYCHLOVAČ** slouží ke zrychlení průběhu zesíťování. Nejvíce využívané a nejučinnější pro urychlování polymerní reakce jsou aminy.

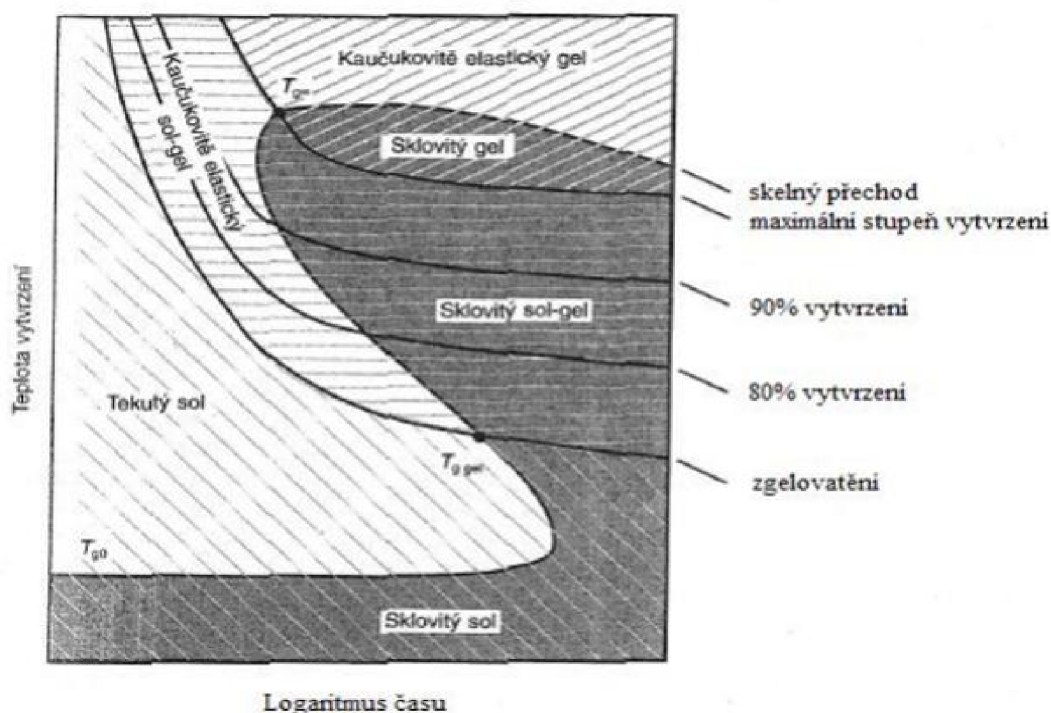
**BARVIVO** se přidává pouze pro estetické rozlišení, čistá pryskyřice je totiž čirá. K barvení se používají prášky organické (tepelně stálé pigmenty), nebo anorganické (křída, grafit, kadmiová červeň, chromová žluť a oranž).

**ZMĚKČOVADLO** neboli flexibilizátor, je přísada zvyšující tvárnost, ohebnost a houževnatost a vnitřní pohyblivost makromolekul, což vede k snížení teploty skelného přechodu, dále snižují i viskozitu. Jde například o fosfátové a ftalátové kyseliny a estery mastných kyselin.

## 2.4 Vytvrzování epoxidů

Důležitým faktorem při zpracování epoxidových pryskyřic je vytvrzování. Jde o chemický proces, při němž dojde ke změně nízkomolekulárních rozpustných a tavitelných monomerů a oligomerů epoxidu na netavitelné a nerozpustné polymery s trojrozměrnou strukturou.

Změna tekuté epoxidové pryskyřice na gel nastává po překročení bodu gelace a nazývá se „želatinace“. Úplné vytvrzení probíhá po překročení teploty skelného přechodu a epoxidové pryskyřice následně získávají nové vlastnosti, mezi něž patří mechanická a tepelná odolnost, elasticita a další. Chování pryskyřice během vytvrzování je zobrazeno v TTT diagramu na Obr. 4. Jde o zobrazení stupně vytvrzení reakční směsi v daném čase a teplotě. Vliv na proces vytvrzování má i druh tvrdidla, např. pryskyřice vytvrzená anhydridy dikarboxylových kyselin je méně navlhavá z důvodu nižší koncentrace hydroxylových skupin. Vlhkost je v procesu zalévání velice nežádoucí faktor, její přítomnost může vytvořit vzduchové bublinky, které následně způsobují částečné výboje, o kterých pojednává kapitola 3.1.1. [7]



Obr. 4: Time-Temperature-Transition Diagram [7]

## 2.4.1 Metody vytvrzování

**POLYADICE NA EPOXIDOVÝCH SKUPINÁCH** – jde o reakce na koncových skupinách, kde jsou polymeračním činidlem sloučeniny s volnými vodíkovými atomy. Z jedné skupiny se uvolní proton a nechá na ní volný elektronový pár.

**POLYKONDENZACE NA PŘÍTOMNÝCH HYDROXYLOVÝCH SKUPINÁCH** – dochází k odštěpení vody. Vznik makromolekuly probíhá současně s kondenzací dvou a více funkčních monomerů.

**POLYMERACE EPOXIDOVÝCH SKUPIN** – probíhá při vytvrzování polyaminy, kdy jde o vytvrzení za běžné teploty při použití cykloalifatických polyaminů a vícefunkčních thiolů, a anhydridy karboxylových kyselin, kdy se vytvrzení uskutečňuje při teplotách 100 až 200 °C. Právě vytvrzování anhydridy karboxylových kyselin se využívá v elektrotechnickém průmyslu pro laminační, zalévací a impregnační hmoty či nátěrové hmoty.

## 3 VADY A DEGRADACE

### 3.1 Vady ve výrobcích

Během výroby se ve výrobcích mohou objevit různé nedostatky, které mohou ovlivnit provozuschopnost či kvalitu výrobku.

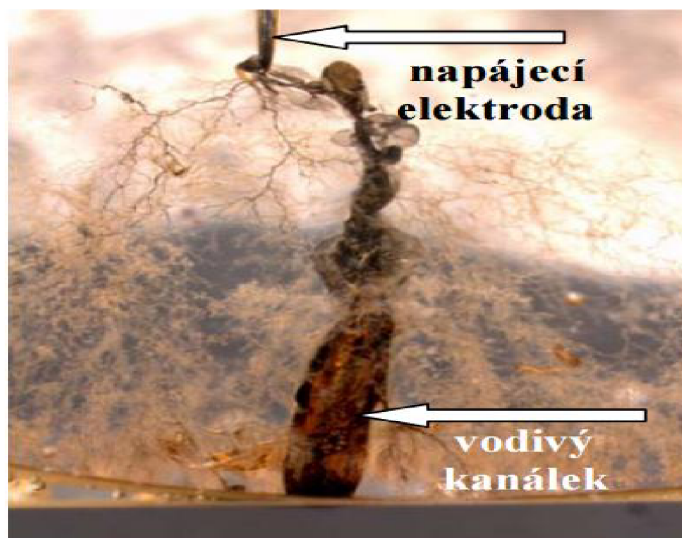
Vady jsou nepřijatelné hned z několika hledisek – technického, estetického a funkčního. Můžeme je rozdělit do 3 kategorií – povrchové, elektrické a mechanické vady. Kvalitu výrobků ovlivňuje mnoho faktorů od výroby funkčních částí, přes vytvoření směsi epoxidu, až po dotvrzování transformátorů. Tyto faktory mohou mít za důsledek vznik částečných výbojů a nedostatečné elektroizolační vlastnosti způsobené bublinami, delaminacemi a póry v izolačním předělu. V této práci nás bude zajímat hlavně vysušení funkčních částí tak, aby nedocházelo k uvolnění bublin (odpaření vlhkosti) z funkčních částí v průběhu zalévacího procesu.

#### 3.1.1 Vady vzniklé chybami v technologickém procesu

Bezporuchovost elektroizolačního systému je u přístrojových transformátorů důležitým parametrem. Ověřuje se měřením izolační pevnosti a hodnotou částečných výbojů.

**ČÁSTEČNÉ VÝBOJE** – jsou definovány jako lokalizovaný elektrický výboj, který zčásti přemostňuje izolaci mezi vodiči a zároveň se může, či nemusí objevit v okolí vodiče. Dle místa výskytu můžeme částečné výboje rozdělit na povrchové, vnitřní a vnější. Jsou způsobeny dutinkami nebo vměstky v izolaci, které mohly vzniknout poškozením, či již v průběhu výrobního procesu. [8]

**ELEKTRICKÉ STROMEČKY** – jde o jev způsobený vlivem elektrického pole, kdy při dostatečné intenzitě elektrického pole vzniknou vodivé cesty, viz Obr. 5. K růstu tohoto nežádoucího jevu dochází při působení částečných výbojů. V případě, že kanálky stromečků přemostí část izolačního předělu tak, že zbylý materiál nemá již dostatečnou elektrickou pevnost, dojde v izolačním materiálu k elektrickému průrazu dielektrika. [9]



Obr. 5: Růst elektrického stromečku v epoxidové pryskyřici [10]

## 3.2 Degradace polymerů

Polymerní materiály jsou během používání vystavovány různým kombinacím faktorů, které přispívají k jejich degradaci. Poškození mohou být chemického, či fyzikálního rázu, případně jejich kombinací.

### FAKTORY ZPŮSOBUJÍCÍ DEGRADACI:

- navlhavost,
- fotooxidace,
- fotolýza,
- termooxidace,
- pyrolýza,
- hydrolýza.

### 3.2.1 Vliv teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic

Některé druhy elektrických degradací, např. elektrické stromečky, jsou závislé na teplotě.

Metodou dielektrické spektroskopie je možné definovat dielektrických vlastností epoxidových pryskyřic sledováním molekulární dynamiky daných materiálů. Speciální vlastnost této metody je rozsah frekvencí od  $10^{-5}$  Hz do  $10^{11}$  Hz, který umožňuje pozorovat odezvy rychlých i pomalých molekulárních pochodů. Při těchto frekvencích polymery reagují na přiložené elektrické pole. [11]

### 3.2.2 Vliv vlhkosti na vlastnosti epoxidových pryskyřic

Absorbovaná voda v epoxidových pryskyřicích výrazně ovlivňuje jejich vnitřní rezistivitu.

Se zvyšujícím se množstvím obsažené vody vnitřní rezistivita klesá až o 7 řádů. Rychlost difúze vody do látky je závislá na čase, aktivační energii a teplotě a hustota difúzního toku je úměrná gradientu koncentrace, což popisuje Fickův zákon (3.1)

$$j = -D * gradc, \quad (3.1)$$

kde  $j$  je hustota difúzního toku,  $D$  je označení pro difúzní koeficient a  $gradc$  je gradient koncentrace. [12]

## 4 VLHKOST

Vlhkost je současně s teplotou hlavní degradační činitel elektroizolačních materiálů. Jejich současné působení může změnit vlastnosti použitých materiálů a následně funkci elektrotechnických zařízení. Konstantní působení teploty a vlhkosti má sice velký dopad na vlastnosti materiálu, avšak větší následky má časté střídání těchto vlivů, jelikož má poté látka schopnost větší absorpce vody, což může vést až k porušení její struktury. Pro zvyšování kvality elektrotechnických zařízení se ke snížení kondenzace na povrchu látky používají např. silikonové kaučuky, či teflon. [13]

### 4.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost je základní vlastností okolního prostředí, které má velký vliv na navlhavost látek a udává množství vodní páry obsažené v určitém množství suchého vzduchu. Pro určení množství této páry jsou potřebné charakteristiky rosného bodu a měrné, absolutní a relativní vlhkosti vzduchu.

**Absolutní vlhkost vzduchu** je hustota vodní páry, která je značně závislá na teplotě a je definována jako hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu.

**Rosný bod** je teplota, kdy relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Kondenzace nastává v momentě, kdy teplota klesne pod tento bod a je možné ji urychlit přítomností kondenzačních jader. Pro různé absolutní vlhkosti je teplota rosného bodu odlišná, s větším množstvím vodní páry ve vzduchu roste i teplota rosného bodu. Za dané teploty může vzduch obsahovat jen dané množství vlhkosti. Pojem rosný bod je v podstatě jen jiné vyjádření absolutní vlhkosti. [14]

**Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu** udává míru nasycení páry, tzn. poměr skutečné k maximální absolutní vlhkosti vzduchu při totožné teplotě při stejných podmínkách (teplotě a tlaku). Klasifikace vlhkosti vzduchu dle procentuálního podílu relativní vlhkosti vzduchu je v Tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení vlhkosti vzduchu

VLHKOST VZDUCHU	RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU
Suchý vzduch	< 50 %
Normální vlhký vzduch	70–80 %
Vlhký vzduch	> 90 %

**Zvyšování vlhkosti vzduchu** – možno docílit vlivem roztoků solí nebo kyselin.

**Snižování vlhkosti vzduchu** – využití tuhých i kapalných hydroskopických látek, např. silikagelu či aktivovaného oxidu hlinitého, které pohlcují vlhkost ze vzduchu až do stavu hydroskopické rovnováhy. [15]

## 4.2 Navlhavost

Navlhavost neboli hydroskopičnost je schopnost materiálu přijímat vlhkost z okolního prostředí, kdy základním dějem je adsorpce usazených molekul vody z povrchu látky.

Než se molekula vody desorbuje, zůstává na povrchu látky po dobu, která je silně závislá na teplotě a vazební energii. Navlhavost je definována přírůstkem hmotnosti vody obsažené v jednotce objemu látky při působení prostředí se 100% relativní vlhkostí. Navlhnuté izolační materiály mají výrazný vliv na celkové elektrické vlastnosti, jako je ztrátový činitel, elektrická pevnost či elektrický odpor. Není však důležité pouze množství pohlcených molekul vody, ale i druh použitého izolačního materiálu. [15] [16]

## 4.3 Absorpce vlhkosti

Dle schopnosti materiálu pohlcovat vlhkost z okolí dělíme látky na hydroskopické a nehydroskopické.

Nehydroskopický materiál je charakteristický tím, že při libovolné vlhkosti vzduchu má vlhkost materiálu tlak nasycené páry. Za předpokladu, že sušící vzduch není vodní parou nasycen, lze z takového materiálu vlhkost zcela odstranit.

V hydroskopickém materiálu závisí obsah vlhkosti na vlhkosti (buňky pohlcováním vlhkosti mění svůj rozměr) a teplotě okolního prostředí. Sušení takových materiálů je složité. Aby nedošlo k jejich znehodnocení v průběhu skladování, musí se uchovávat v dobře uzavřených nádobách v suchém prostředí (nejlépe v exsikátoru). [14]

## 4.4 Oblasti možného vniku vlhkosti do používaných materiálů

Během většiny z těchto procesů může materiál navlhnout, ať už vlivem vzdušné vlhkosti, či přímo během zalévání epoxidem.

Z materiálového pohledu zahrnuje proces výroby následující body:

- doprava a uskladnění materiálu,
- výroba funkčních částí přístrojových transformátorů,
- naformování funkčních částí do forem či rámců,
- předehřev a vysušení částí a forem v předehřívací peci či tunelu.

## 5 SUŠENÍ

Sušení je proces, kdy v daném materiálu dochází ke snižování nežádoucího obsahu vody. Případné vysoušení používaných materiálů by zamezilo vzniku bublin v konečném produktu.

Proces sušení má 2 části:

- vnější difúze – difundují pouze molekuly vody z povrchu materiálu,
- vnitřní difúze – molekuly vody zevnitř materiálu se začnou pohybovat k jeho povrchu.

### 5.1 Způsoby odvlhčování

**Odvhlčování teplým vzduchem** – využití změny stavu vzduchu, kdy při větší teplotě dokáže pohltit větší množství vlhkosti. Při použití této metody musí být zajištěna kvalitní výměna zahřátého vzduchu. Tento způsob je však nákladný z důvodu použitého velkého topného výkonu. [17]

**Odvhlčování kondenzací** – ochlazením ovlhčeného vzduchu pod teplotu rosného bodu a následným zahřátím se vlhkosti zbavíme vlivem kapalně přeměny neboli kondenzace. Tento způsob je ve srovnání s odvlhčováním teplým vzduchem účinnější a energeticky úspornější.

**Odvhlčování absorpcí** – pohlcování vzdušné vlhkosti díky schopnosti hydrofobického materiálu, např. silikagelu.

### 5.2 Odvlhčování vzduchu

Pro odvlhčování vzduchu existuje několik možných metod – pohlcování vody absorpčními látkami nebo přimícháváním sušícího vzduchu a ochlazení pod mez kondenzace, které je založeno na principu, kdy vlhký vzduch přichází do kontaktu s chladicí plochou o nižší teplotě než teplota rosného bodu. Důsledkem toho na této ploše zkondenzuje určité množství vodních par, čímž se sníží jejich obsah ve vzduchu.

### 5.3 Přehled sušáren

K sušení materiálů se podle způsobu dodávané energie rozlišuje několik typů sušáren – kombinované, kontaktní, konvekční a radiační. Dále lze sušárny dělit i podle režimu provozování na periodické a kontinuální. V následujících kapitolách budou rozebrány zejména kontaktní, konvekční a radiační sušárny včetně jejich představitelů.

### **5.3.1 Konvekční sušárny**

Je možné je dělit dle formy sušeného materiálu, nebo podle provozního tlaku.

Základní představitelé:

- komorové sušárny,
- vozokomorové sušárny,
- sušárny s pásovým dopravníkem,
- páternosterové sušárny,
- kondenzační sušárny,
- fluidní sušárny,
- rotační bubnové sušárny,
- rozprašovací sušárny,
- pneumatické sušárny,
- turbínové sušárny.

### **5.3.2 Kontaktní sušárny**

V porovnání s konvekčními sušárnami mají výhodu v kontaktu sušeného materiálu a vyhřívané plochy. Díky tomuto kontaktu se sušený materiál rychleji ohřívá vlivem nižšího tepelného odporu přenosu tepla. [17]

Základní představitelé:

- sublimační sušárny,
- vakuové sušárny,
- lopatkové sušárny.

### **5.3.3 Radiační sušárny**

Radiační sušárny pracují s dodáváním tepelné energie bezkontaktně.

Základní představitelé:

- mikrovlnné sušárny,
- sušárny s dielektrickým ohřevem,
- sušárny s infračerveným ohřevem.



## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo určit vlhkost používaných bandážovacích a prokladových materiálů. Z naměřených dat je možné stanovit dobu potřebnou k vysušení vzorků, množství vlhkosti obsažené v materiálech a také jejich vhodnost.

### 6.1 Stanovení vlhkosti ve vrstvených vzorcích prokladů a bandáží

Úkolem první praktické části bylo měření vlhkosti více vrstev vzorků.

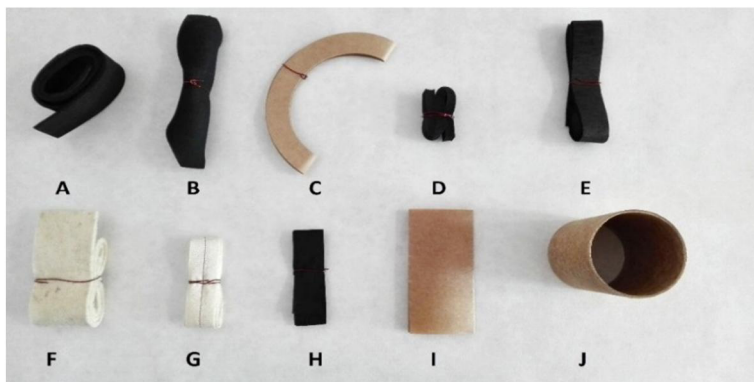
Vrstvené vzorky byly použity z důvodu přiblížení se reálné situaci ve výrobě, kdy jsou funkční části transformátoru bandážovány několika vrstvami. Všechny vzorky byly odebrány z prostor, kde jsou běžně uchovávány. Měření probíhalo v intervalech od počátku měření po 3, 4, 21 a 24 hodinách. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 638 (500417), kdy jsme vzorky sušili při 105 °C s posledním krokem 135 °C z důvodu určení těkavých látek. Zvýšení teploty proběhlo po 21 hodinách, posledním krokem jsou tedy myšleny poslední 3 hodiny měření. Z důvodu používané teplotě 90 °C u vakuového předehřevu, bylo pro totéž měření zvoleno sušení také při teplotě 90 °C.

#### 6.1.1 Postup měření

Zvolené vzorky prokladů a bandáží byly navrstveny a zpevněny měděným drátkem, viz Obr. 6. Po zvážení každého vzorku na váze METTLER-TOLEDO AT200 byly všechny materiály sušeny v sušárně VENTICELL 24 hodin při daných teplotách. Ve stanovených dobách došlo k vyjmutí vzorků a po vychladnutí v exsikátoru byly opětovně váženy pomocí váhy METTLER-TOLEDO AT200. Tento postup byl několikrát opakován v průběhu celého měření a všechny hodnoty byly zaznamenávány do Tab. 2.

#### 6.1.2 Měřené vzorky

V rámci ochrany know-how firmy není možné uvést přesné názvy používaných materiálů, jsou tedy vzestupně označeny písmeny abecedy. Fotografie měřených vzorků jsou na Obr. 6.



Obr. 6: Měřené vrstvené vzorky prokladových a bandážovacích materiálů

### 6.1.3 Naměřené hodnoty

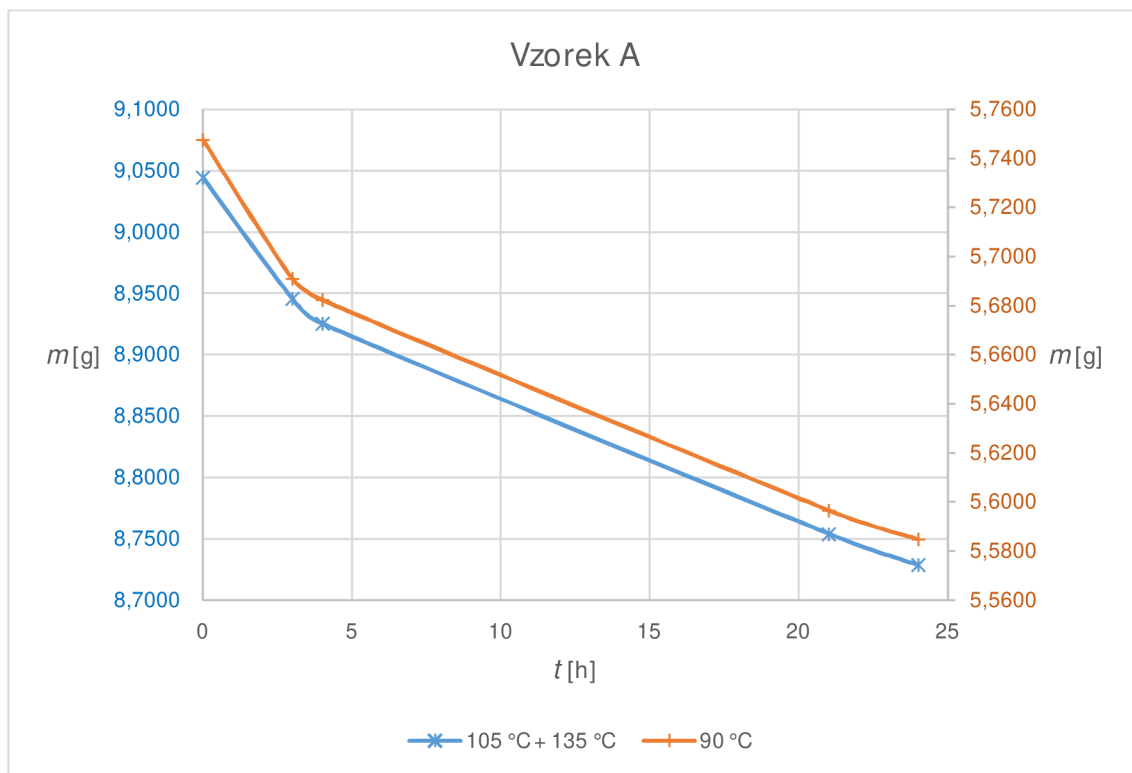
Všechny hodnoty získané měřením během sušení při 105 °C s posledním krokem 135 °C a také z měření se sušicí teplotou 90 °C jsou zaznamenány v Tab. 2.

Tab. 2: Naměřená hmotnost vzorků v gramech

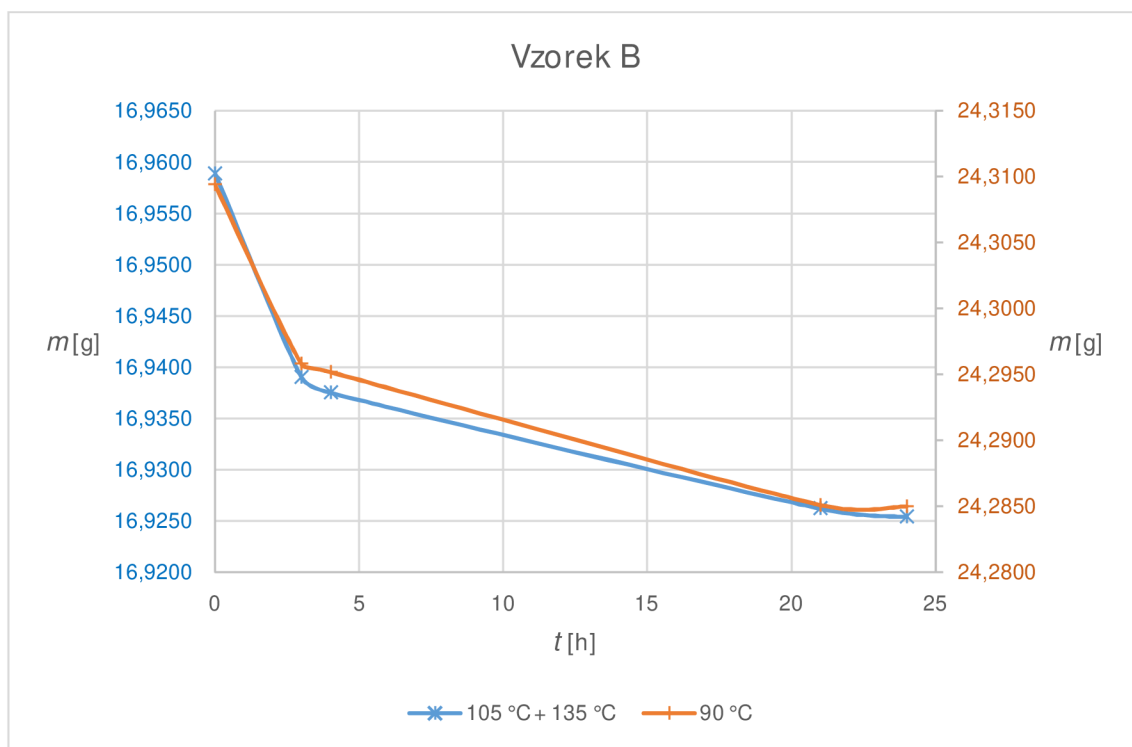
Vzorek	θ [°C]	t [h]				
		0	3	4	21	24
A	105 °C + 135 °C	9,0444	8,9458	8,9253	8,7541	8,7286
	90 °C	5,7476	5,6910	5,6823	5,5966	5,5848
B	105 °C + 135 °C	16,9589	16,9390	16,9375	16,9262	16,9254
	90 °C	24,3094	24,2958	24,2952	24,2851	24,2850
C	105 °C + 135 °C	7,1966	6,8649	6,8506	6,8404	6,8428
	90 °C	7,0639	6,7819	6,7785	6,7633	6,7615
D	105 °C + 135 °C	2,7994	2,7877	2,7867	2,7773	2,7766
	90 °C	3,1294	3,1212	3,1200	3,1136	3,1127
E	105 °C + 135 °C	4,2122	3,7985	3,7741	3,7783	3,7820
	90 °C	4,5456	4,3998	4,3892	4,3885	4,3885
F	105 °C + 135 °C	13,2740	12,5376	12,5253	12,5099	12,5145
	90 °C	10,6395	10,1440	10,1266	10,1230	10,1232
G	105 °C + 135 °C	3,2709	3,1647	3,1565	3,1504	3,1535
	90 °C	2,9423	2,8702	2,8670	2,8638	2,8630
H	105 °C + 135 °C	4,4251	4,2665	4,2630	4,2549	4,2566
	90 °C	4,4290	4,3087	4,3056	4,2993	4,2987
I	105 °C + 135 °C	1,7476	1,7340	1,7329	1,7304	1,7306
	90 °C	2,0009	1,9930	1,9922	1,9907	1,9905
J	105 °C + 135 °C	28,1115	27,8520	27,8172	27,5924	27,5724
	90 °C	53,1330	52,8686	52,8271	52,6162	52,5975

### 6.1.4 Vynesené grafické závislosti

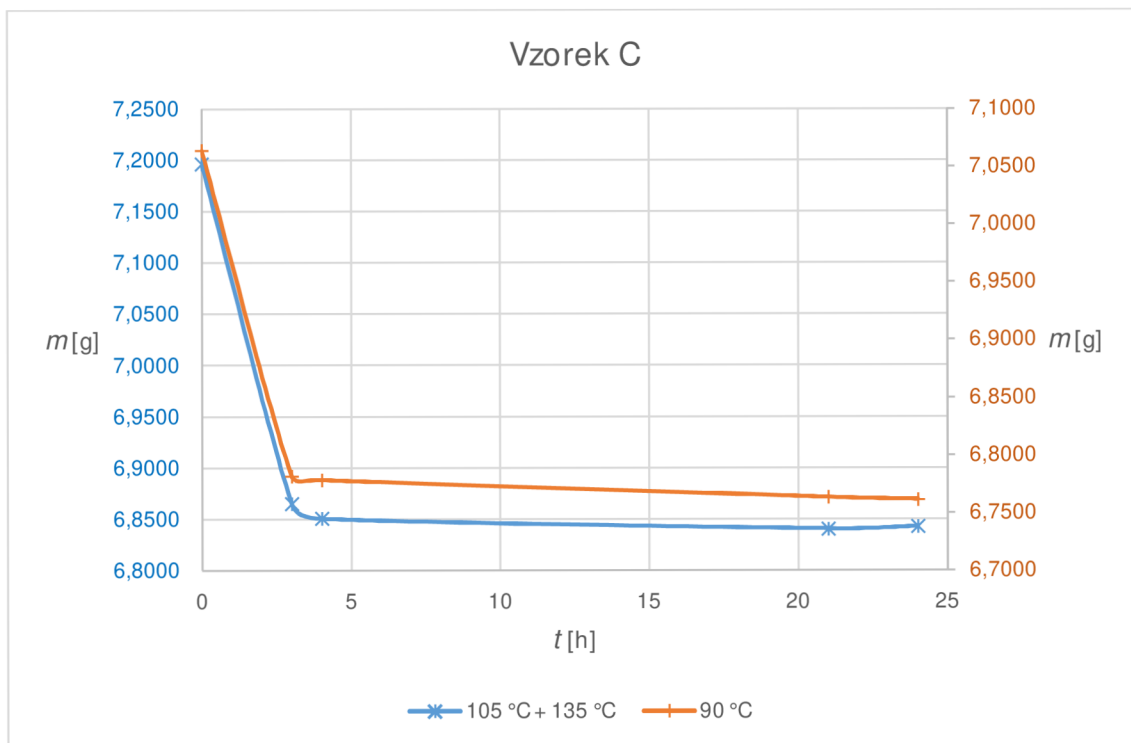
Veškerá naměřená data jsou vynesena v grafických závislostech – Graf 1, Graf 2, Graf 3, Graf 4, Graf 5, Graf 6, Graf 7, Graf 8, Graf 9, Graf 10.



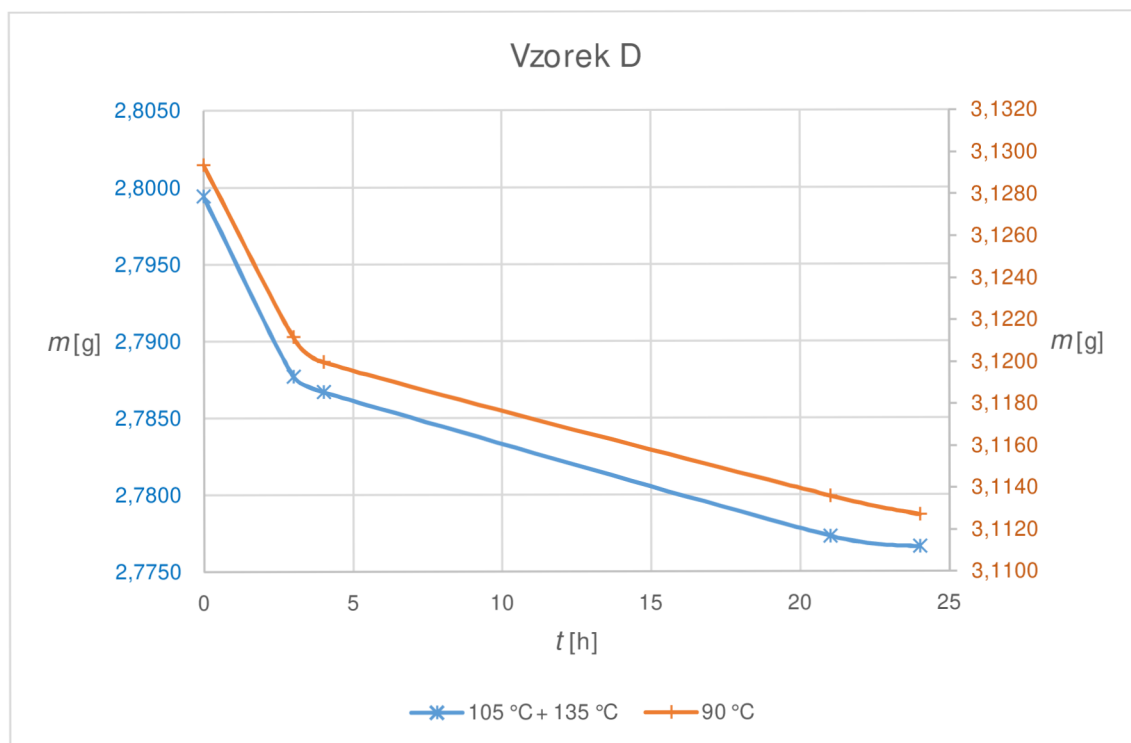
Graf 1: Vynesené grafické průběhy pro vzorek A



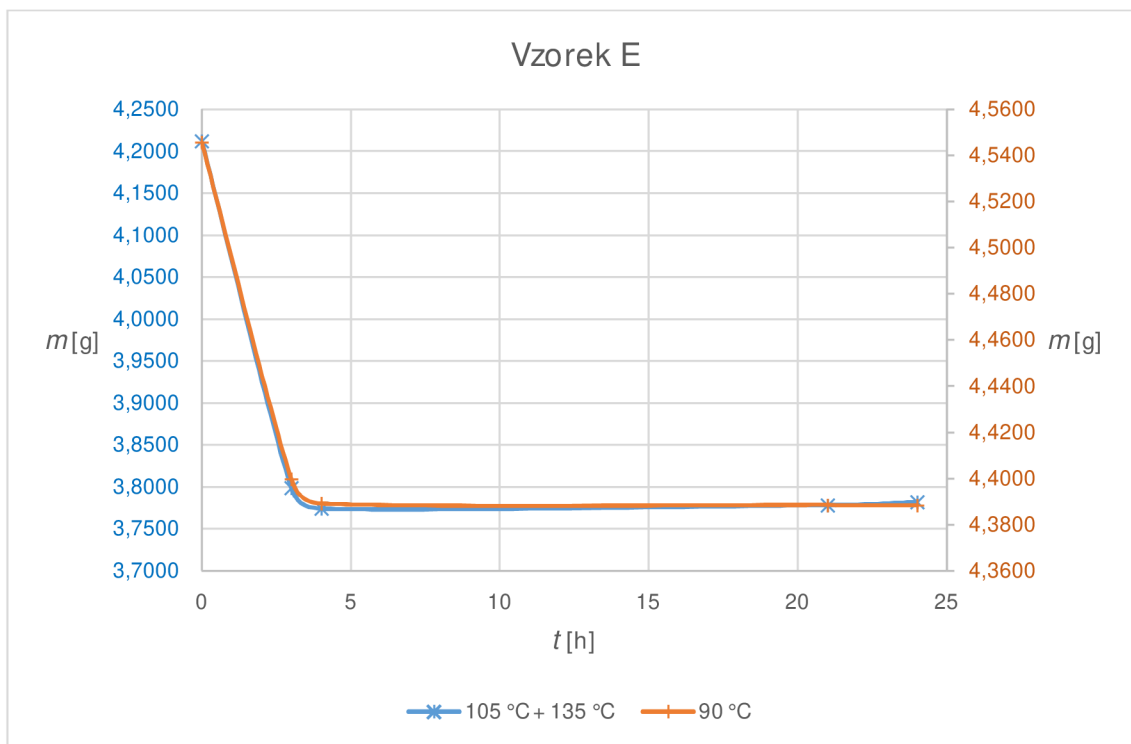
Graf 2: Vynesené grafické průběhy pro vzorek B



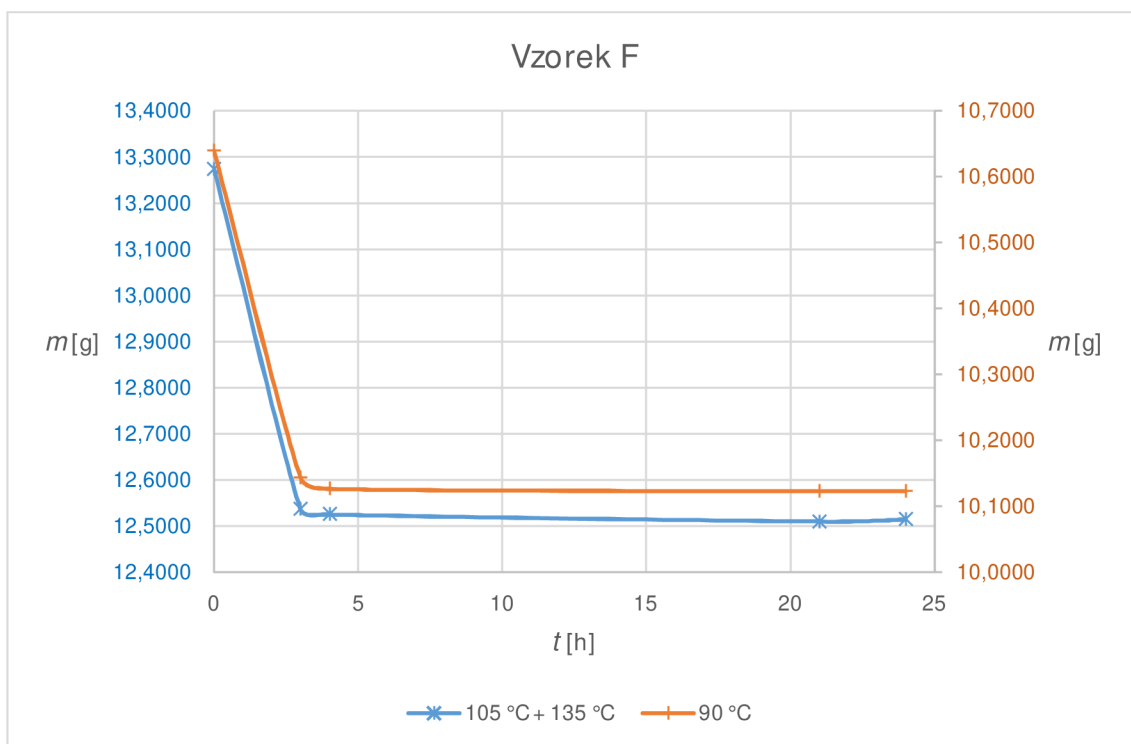
Graf 3: Vynesené grafické průběhy pro vzorek C



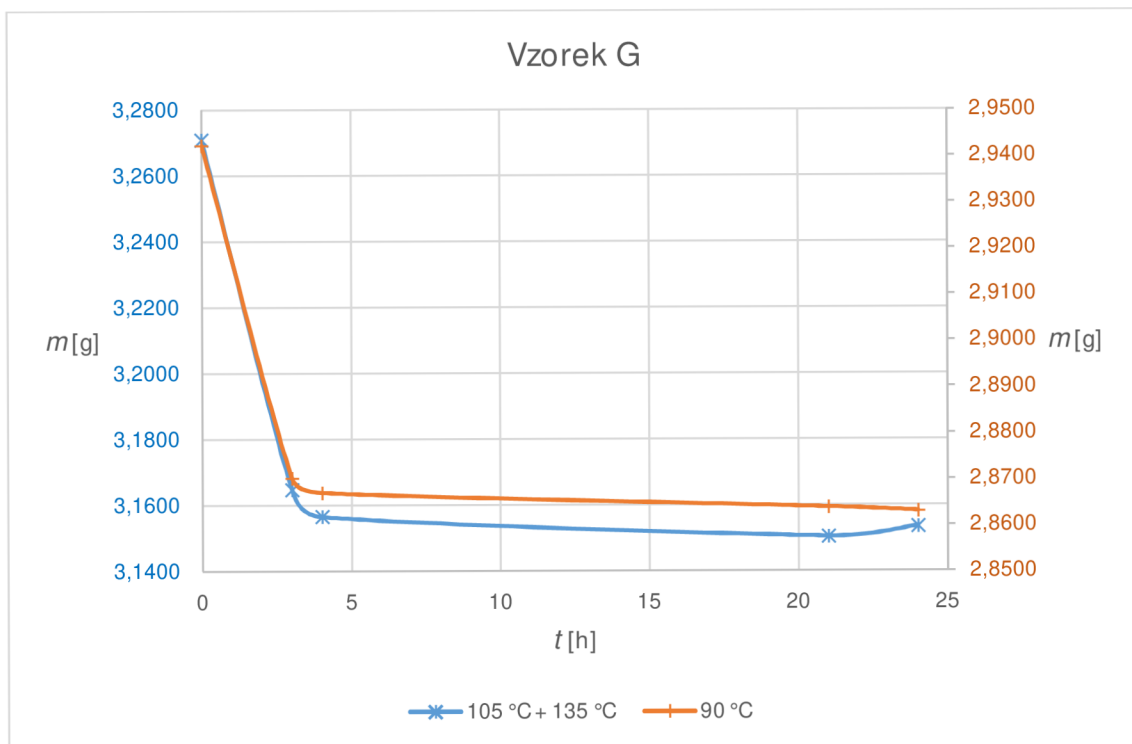
Graf 4: Vynesené grafické průběhy pro vzorek D



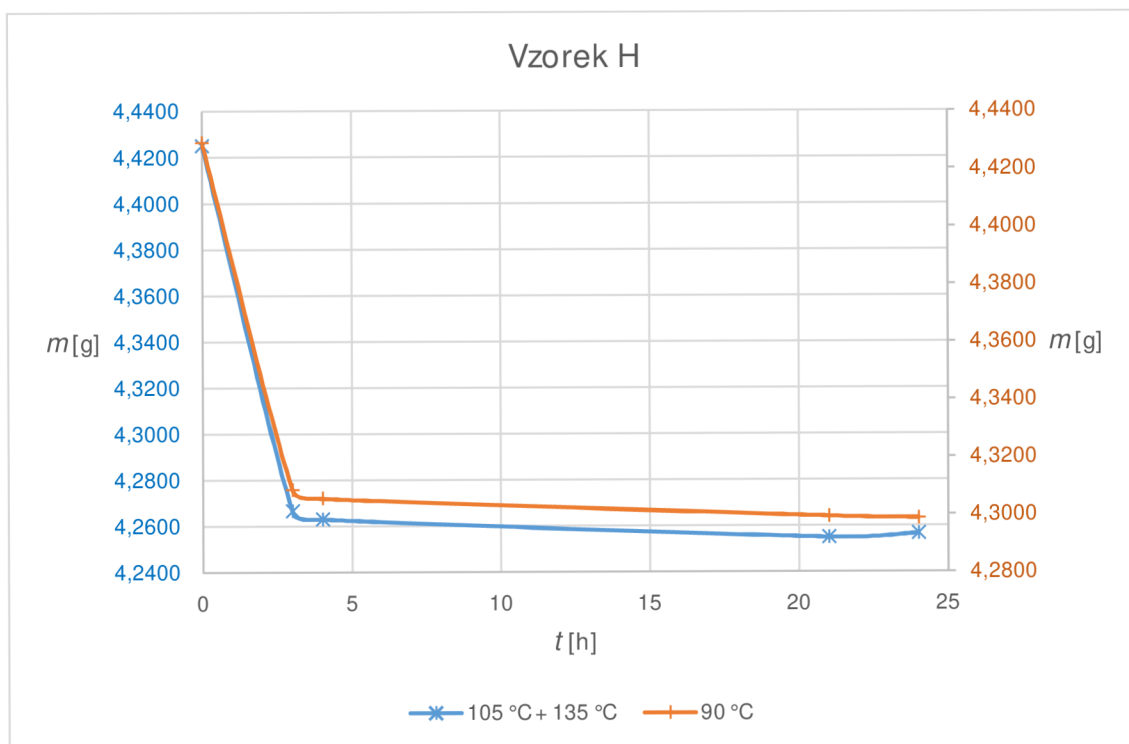
Graf 5: Vynesené grafické průběhy pro vzorek E



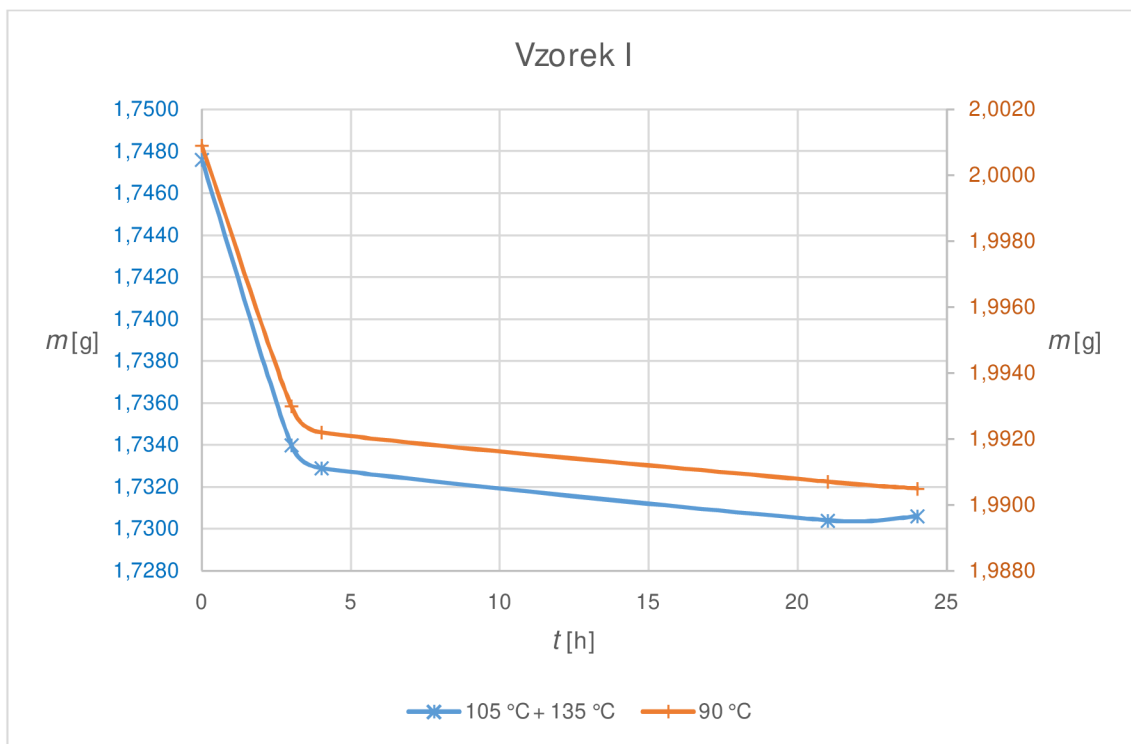
Graf 6: Vynesené grafické průběhy pro vzorek F



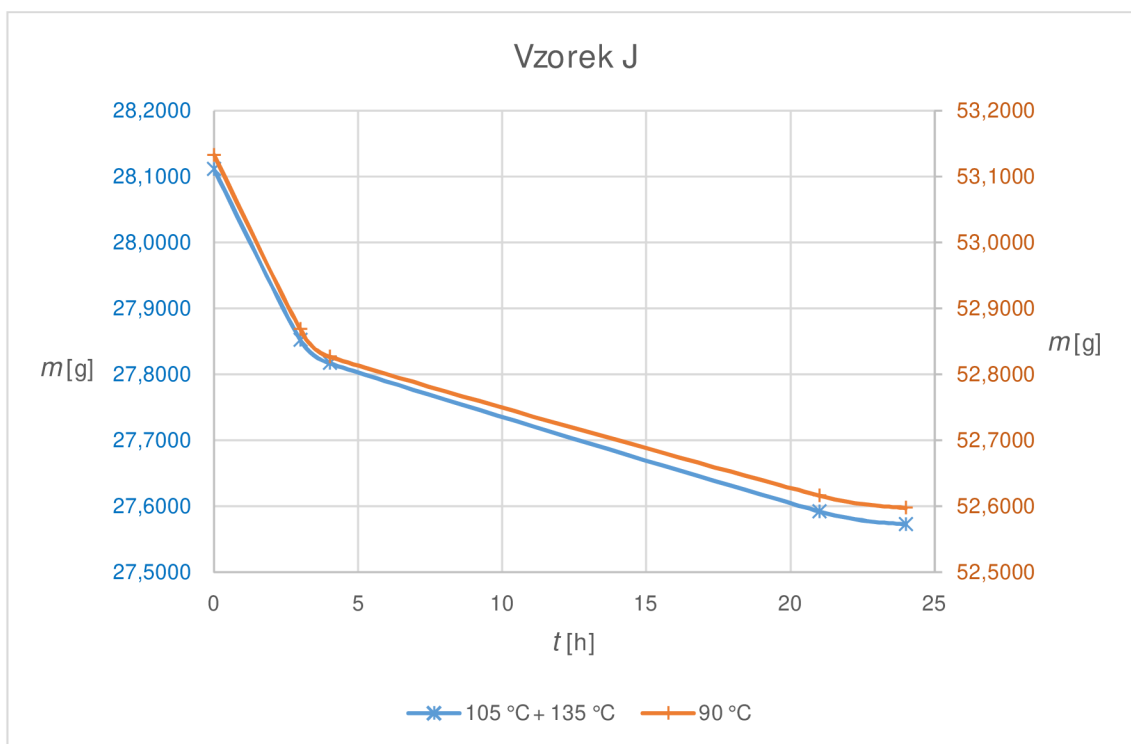
Graf 7: Vynesené grafické průběhy pro vzorek G



Graf 8: Vynesené grafické průběhy pro vzorek H



Graf 9: Vynesené grafické průběhy pro vzorek I



Graf 10: Vynesené grafické průběhy pro vzorek J

## 6.2 Měření možných náhradních materiálů

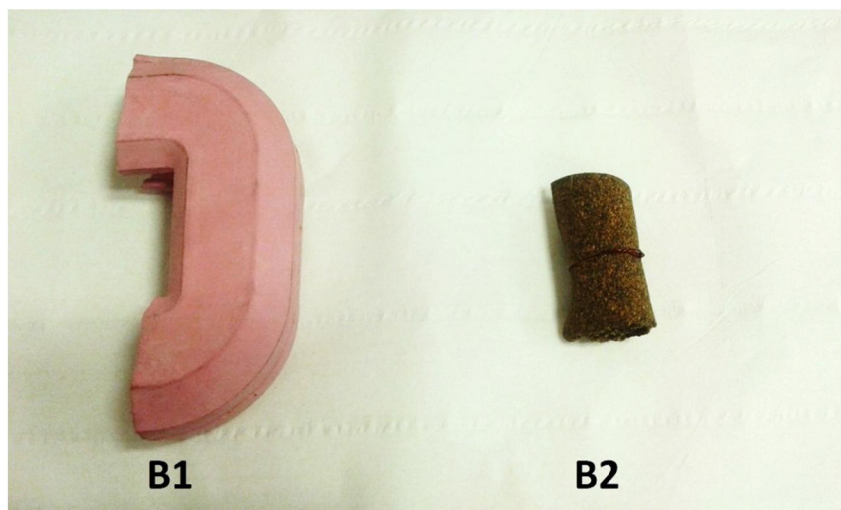
Vzhledem k dlouhé době vysoušení byly pro vzorky B a J zvoleny 2 možné náhrady, viz. Obr. 7 a Obr. 8. Tyto vzorky se sušily při 90 °C a pro snazší porovnání se měřily ve shodných časových intervalech jako původní materiál.

### 6.2.1 Postup měření

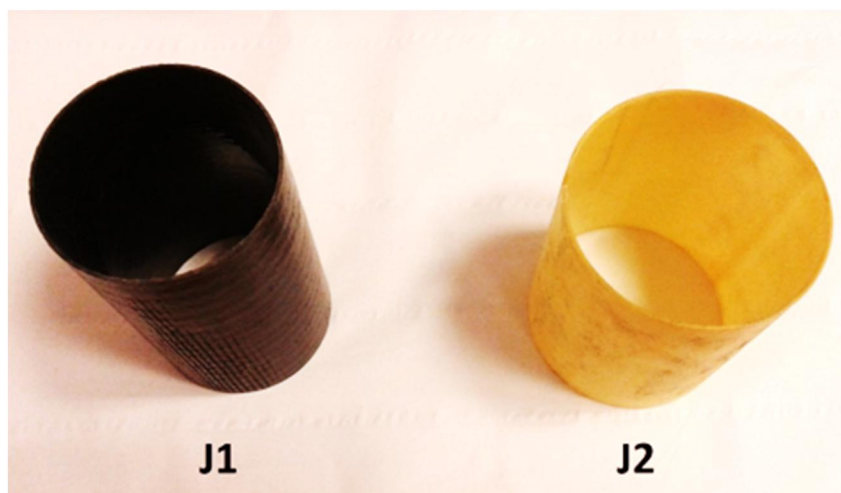
Postup měření byl shodný s předchozím měřením s jediným rozdílem v teplotě, která byla po celou dobu sušení 90 °C. Hodnoty byly opět průběžně zaznamenávány do Tab. 3.

### 6.2.2 Měřené vzorky

Fotografie měřených náhradních materiálů ke vzorku B a J jsou na Obr. 7 a Obr. 8.



Obr. 7: Náhradní materiály vzorku B



Obr. 8: Náhradní materiály vzorku J



### 6.2.3 Naměřené hodnoty

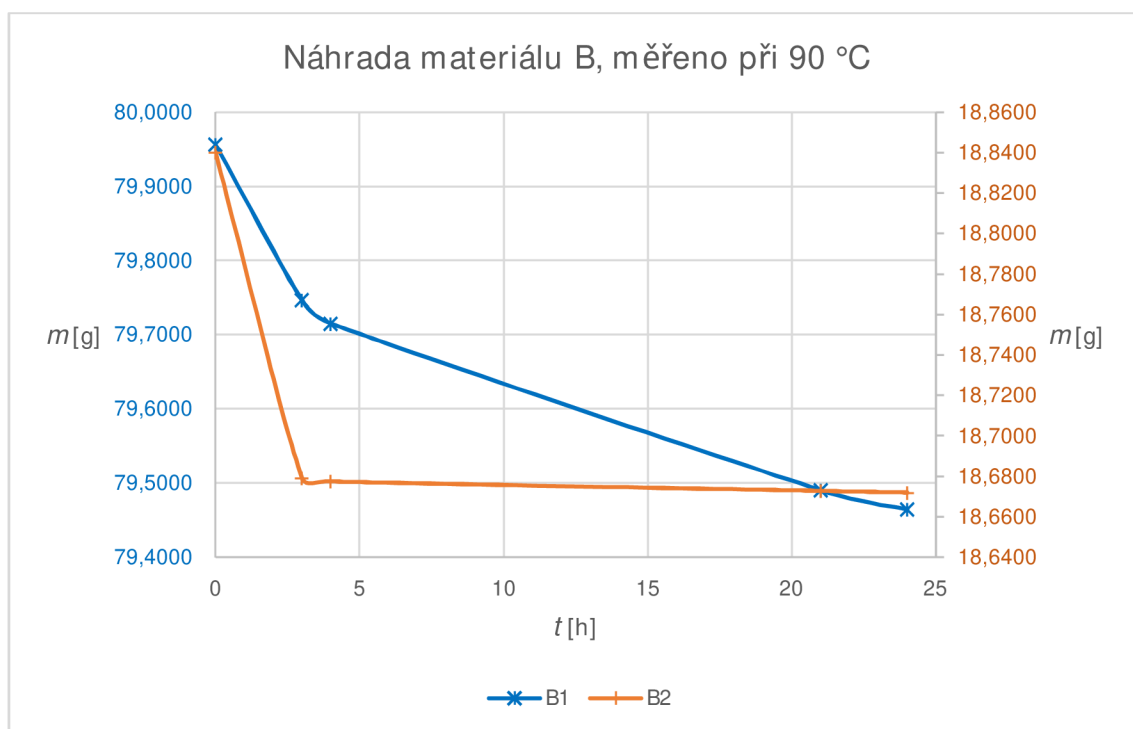
Získané hodnoty v průběhu měření náhradních materiálů jsou zaznamenány v Tab. 3.

Tab. 3: Naměřená hmotnost vzorků v gramech při teplotě sušení 90 °C

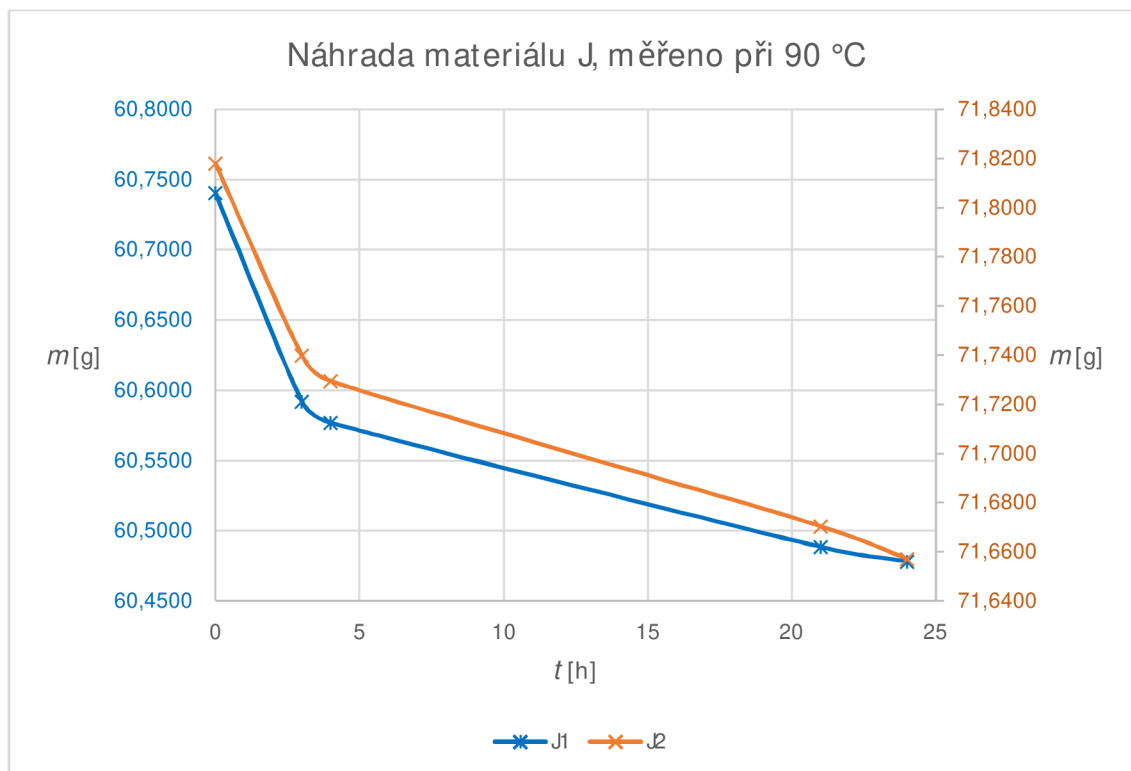
Vzorek	t [h]				
	0	3	4	21	24
B1	79,9565	79,7467	79,7150	79,4905	79,4646
B2	18,8402	18,6792	18,6775	18,6728	18,6720
J1	60,7404	60,5920	60,5769	60,4884	60,4782
J2	71,8179	71,7398	71,7294	71,6704	71,6570

### 6.2.4 Vynesené grafické závislosti

Veškeré naměřené hodnoty získané při měření náhradních materiálů ke vzorkům B a J jsou vyneseny v grafech – Graf 11, Graf 12.



Graf 11: Vynesené grafické průběhy pro náhradní materiál k vzorku B



Graf 12: Vynesené grafické průběhy pro náhradní materiál k vzorku J

### 6.3 Hmotnostní vlhkost

Pro porovnání vzorků z pohledu vysoušení a obsažené vlhkosti byla naměřená data přepočítána dle vzorce 6.1 na hmotnostní vlhkost.

Tyto hodnoty byly zaznamenány v Tab. 4 a následně vyneseny do grafů – Graf 13, Graf 14. Pro lepší srovnání náhrad vzorku B byly do Graf 15 vyneseny hodnoty hmotnostní vlhkosti jak pro náhradní materiály B1 a B2, tak hodnoty pro původní vzorek B. Totéž platí pro náhrady vzorku J v Graf 16.

Přepočet na hmotnostní vlhkost byl proveden dle vzorce

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} * 100\%, \quad (6.1)$$

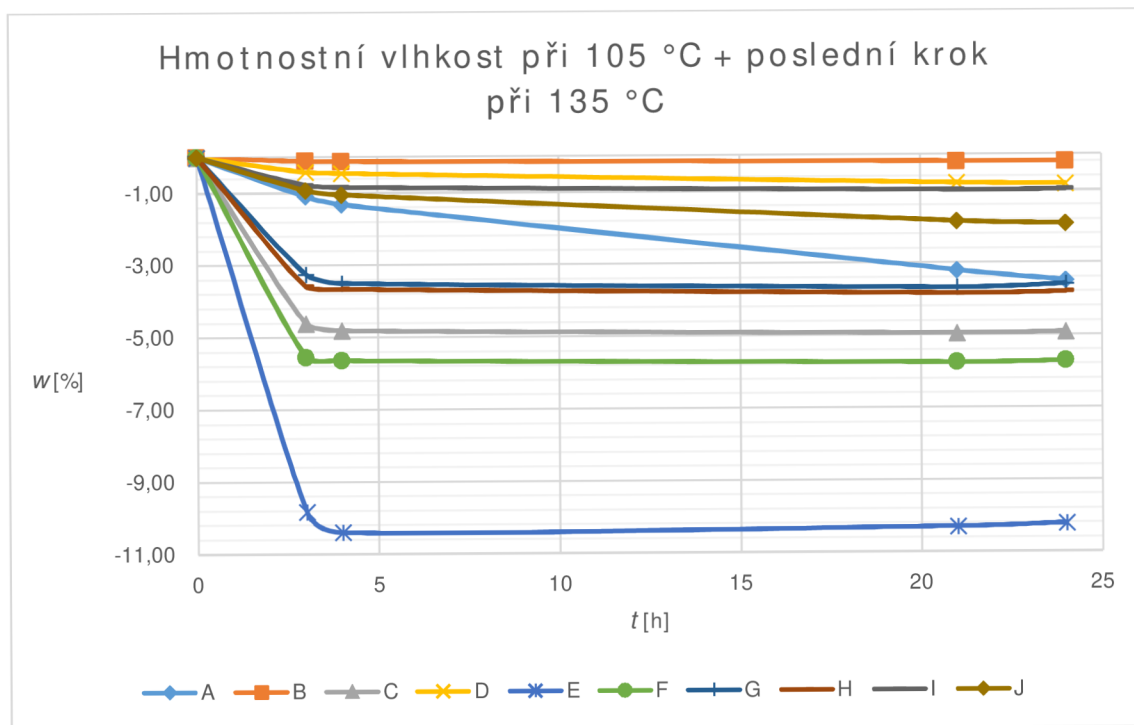
kde  $m$  je počáteční hmotnost vzorku a  $m_d$  je hmotnost vzorku po sušení.

Tab. 4: Hodnoty hmotnostní vlhkosti v % přepočtené z naměřených dat dle (6.1)

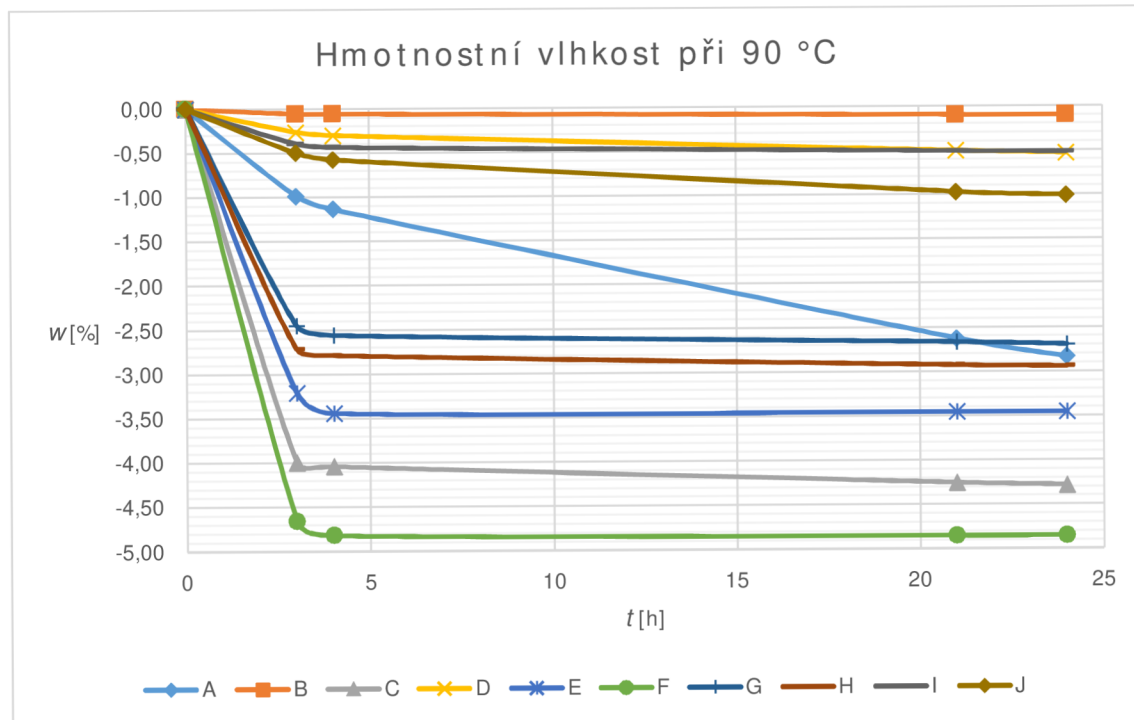
Vzorek	θ [°C]	t [h]				
		0	3	4	21	24
A	105 °C + 135 °C	0,0000	-1,0902	-1,3168	-3,2097	-3,4917
	90 °C	0,0000	-0,9848	-1,1361	-2,6272	-2,8325
B	105 °C + 135 °C	0,0000	-0,1173	-0,1262	-0,1928	-0,1975
	90 °C	0,0000	-0,0559	-0,0584	-0,1000	-0,1004
C	105 °C + 135 °C	0,0000	-4,6091	-4,8078	-4,9496	-4,9162
	90 °C	0,0000	-3,9921	-4,0403	-4,2554	-4,2809
D	105 °C + 135 °C	0,0000	-0,4179	-0,4537	-0,7895	-0,8145
	90 °C	0,0000	-0,2620	-0,3004	-0,5049	-0,5336
E	105 °C + 135 °C	0,0000	-9,8215	-10,4007	-10,3010	-10,2132
	90 °C	0,0000	-3,2075	-3,4407	-3,4561	-3,4561
F	105 °C + 135 °C	0,0000	-5,5477	-5,6403	-5,7564	-5,7217
	90 °C	0,0000	-4,6572	-4,8207	-4,8546	-4,8527
G	105 °C + 135 °C	0,0000	-3,2468	-3,4975	-3,6840	-3,5892
	90 °C	0,0000	-2,4505	-2,5592	-2,6680	-2,6952
H	105 °C + 135 °C	0,0000	-3,5841	-3,6632	-3,8462	-3,8078
	90 °C	0,0000	-2,7162	-2,7862	-2,9284	-2,9420
I	105 °C + 135 °C	0,0000	-0,7782	-0,8412	-0,9842	-0,9728
	90 °C	0,0000	-0,3948	-0,4348	-0,5098	-0,5198
J	105 °C + 135 °C	0,0000	-0,9231	-1,0469	-1,8466	-1,9177
	90 °C	0,0000	-0,4976	-0,5757	-0,9727	-1,0078
B1	90 °C	0,0000	-0,3020	-0,3020	-0,5828	-0,6152
B2	90 °C	0,0000	-0,8636	-0,8636	-0,8885	-0,8928
J1	90 °C	0,0000	-0,2692	-0,2692	-0,4149	-0,4317
J2	90 °C	0,0000	-0,1232	-0,1232	-0,2054	-0,2240

### 6.3.1 Vynesené grafické závislosti

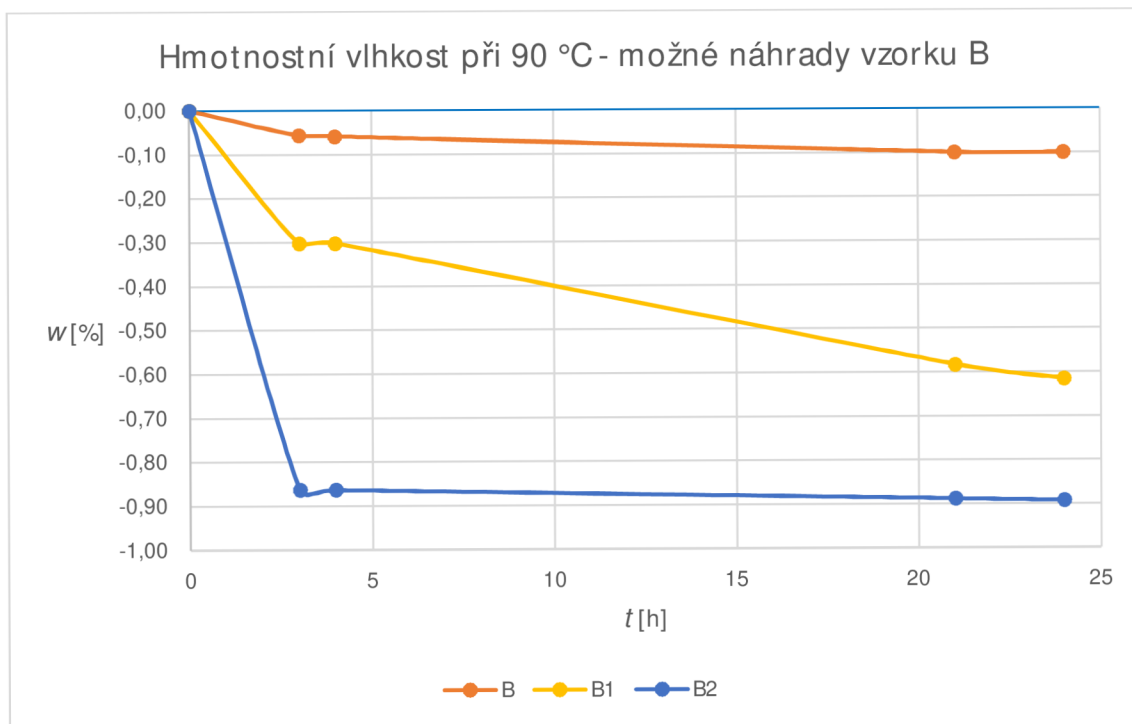
Veškeré hodnoty získané přepočtem na hmotnostní vlhkost jsou vyneseny v grafických závislostech – Graf 13, Graf 14, Graf 15, Graf 16.



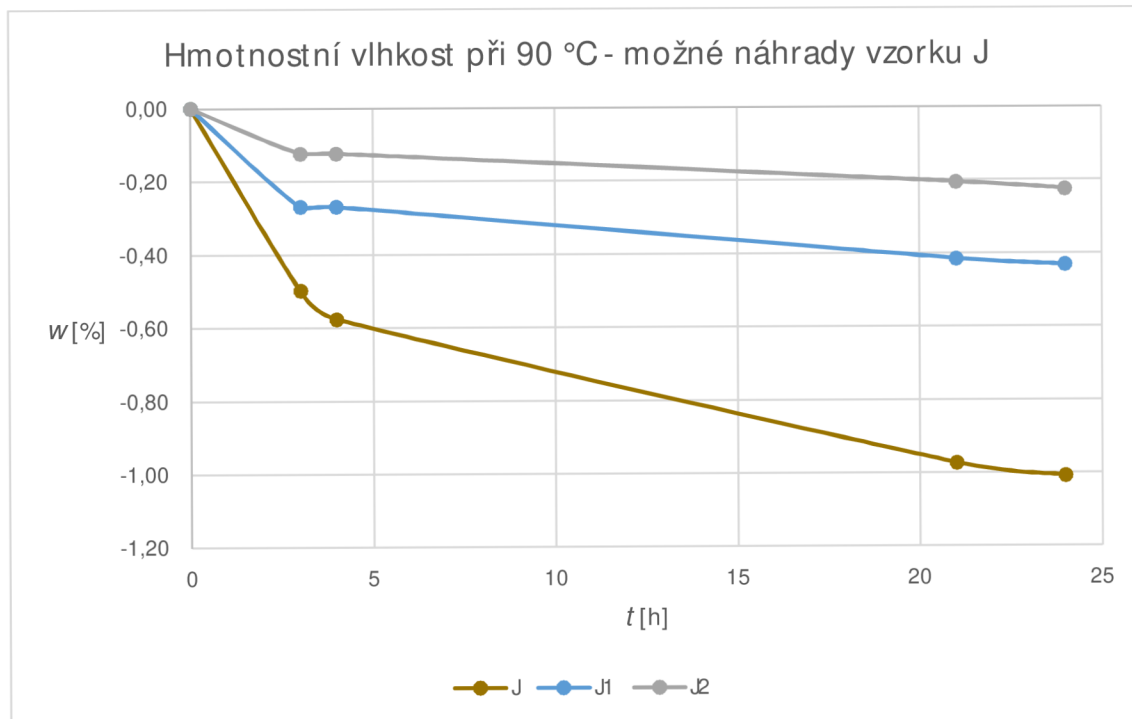
Graf 13: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti současně používaných materiálů sušených při 105 °C s posledním krokem při 135 °C



Graf 14: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti současně používaných materiálů sušených při 90 °C



Graf 15: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti možných náhradních materiálů ke vzorku B



Graf 16: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti možných náhradních materiálů ke vzorku J

## 6.4 Přístroje použité při realizaci praktické části

### 6.4.1 Váha METTLER-TOLEDO AT200

Váha, která byla při měření použita na průběžné vážení vzorků, je na Obr. 9. Její technické parametry jsou zaznamenány na Obr. 10.



Obr. 9: Váha METTLER-TOLEDO AT200

#### Technické parametry:

Model	AT21 Comparator	AT20	AT201	AT261 DeltaRange 60 g DeltaRange 200 g	AT200	AT400	AT460 DeltaRange 60 g DeltaRange 400 g
Readability	1 µg	2 µg	0.01 mg	0.01 mg	0.1 mg	0.1 mg	0.1 mg
Weighing capacity	22 g	22 g	205 g	62 g	205 g	405 g	405 g
Taring range (by subtraction)	0...22 g	0...22 g	0...205 g	0...205 g	0...205 g	0...405 g	0...405 g
Reproducibility (s) 0...20 g	2 µg	3 µg					
Reproducibility (s) 0...50 g			0.015 mg	0.015 mg	0.04 mg	0.05 mg	0.05 mg
Reproducibility (s) 50...100 g			0.02 mg	0.02 mg	0.05 mg	0.07 mg	0.07 mg
Reproducibility (s) 100...200 g			0.03 mg	0.03 mg	0.05 mg	0.09 mg	0.09 mg
Reproducibility (s) 200...400 g					0.15 mg	0.15 mg	0.3 mg
Linearity	± 8 µg	± 8 µg	± 0.12 mg	± 0.03 mg	± 0.15 mg	± 0.15 mg	± 0.1 mg
Linearity referred to 5 g	± 5 µg	± 5 µg	± 0.02 mg	± 0.02 mg		± 0.5 mg	± 0.8 mg
Stabilization time (typical) variable with vibration adapter	14,18,24 s	10,14,24 s	10,14,20 s	8,12,18 s	3,5,7 s	3,5,7 s	4,6,10 s
Built-in calibration weights	2x10 g	2x10 g	2x100 g	2x100 g	2x100 g	2x100 g	2x100 g
Calibration FACT	Fully automatic motorized self-calibration with two built-in weights (manual triggering also possible). Test possibility to check the calibration.						
Calibration with external weight:	20 g	20 g	200 g	200 g	200 g	400 g	400 g
Display with METTLER Deltatrac	LCD (liquid crystal)					VFD (vacuum fluorescent)	
Display sequence	0.2...0.4 s variable						
Sensitivity drift (5...40°C)	Maximum deviation with automatic self-calibration ±0.00015%, (with automatic self-calibration switched off) 1 ppm/°C.						
Linearization	Automatic self-linearization of the weighing curve (simultaneously with motorized calibration FACT).						
Data interface	CL and RS232C, bidirectional, built in as standard, all lines galvanically separated.						
Glass draft shield	No hindering guideways; automatic motorized opening or at a keystroke.						
Inner draft shield AT	Standard					Accessory	
AC adapter (to national codes)	Voltage 115 V or 230 V, admissible voltage fluctuations: +15...-20%. Frequency: 50...60 Hz; power consumption 15.5W max.						
Admissible ambient conditions	Temperature: 5...40 °C; relative humidity: 25...85% (non-condensing). Height above sea level: -500...+6000 m.						
Weighing pan feedthrough for below-the-balance weighing.	ø 28 mm suspended	ø 32 mm	80x80 [mm]; stainless steel				
Measures	Free height above weighing pan 239 mm, Balance housing 241x433x289 (WxLxH), AC adapter 115x140x53mm (WxLxH)						
Weight	Balance 9.3 kg, AC adapter 1.2 kg						

Obr. 10: Technické parametry váhy METTLER-TOLEDO [18]

### 6.4.2 Vakuový skleněný exsikátor

Vakuový skleněný exsikátor byl použit pro vychladnutí vzorků, viz Obr. 11.



Obr. 11: Vakuový skleněný exsikátor

### 6.4.3 Sušárna VENTICELL BMT typ standard 55

Sušárna VENTICELL typu standard 55 byla určena pro sušení vzorků, viz. Obr. 12. Její technické parametry jsou zaznamenány na Obr. 13.



Obr. 12: Sušárna VENTICELL BMT



## Technické parametry:

Vnitřní prostor nerez DIN 1.4301

- objem	55 l
- hloubka	390 mm
- šířka	400 mm
- výška	350 mm

Síta

- standardní vybavení	2 ks
- úložná plocha (š × h)	380×335 mm
- vedení pro síta	4 max. počet
- vzdálenost vedení	70 mm

Maximální přípustné zatížení sít \*)

- nosnost celkem	50 kg/skříň
- nosnost síta	20 kg/síto

počet dveří

-	1 ks
---	------

Vnější rozměry (vč. dveří a madla)

- hloubka	640 mm
- průměr větracího hrdla vnější / vnitřní	52/49 mm
- šířka	620 mm
- výška, s nohama (N), a kolečky (K)	680 (N) mm

Obal - rozměry (třívrstvý karton)

- hloubka	730 mm
- šířka	700 mm
- výška (vč. palety)	880 mm

Hmotnost

- brutto	66 kg
- netto	55 kg

Pracovní teplota (začátek regulace)

- od 5 °C nad okolní teplotu do:	250 °C
----------------------------------	--------

Odchytky teploty podle DIN 12 880 díl 2, od pracovní teploty při zavřené odvětrávací klapce a dveřích

- časově cca (±)	0,3 °C
- prostorově cca (±) % z dosažené teploty	2 %

Doba náběhu na teplotu 250°C při uzavřené klapce a napětí 230 V

-	59 min
---	--------

Tepelné ztráty při 250 °C

-	590 W
---	-------

Počet výměn vzduchu při 250°C

-	8 za hodinu
---	-------------

Elektrické parametry - síť 50/60 Hz

- max. příkon	1,2 kW
- napětí	230 V
- proud	5,2 A
- příkon v pohotovostním stavu (stand by)	5 W

Obr. 13: Technické parametry sušárny VENTICELL BMT [19]



## 7 ZÁVĚR

V rámci první části bakalářské práce byl sepsán teoretický přehled, ve kterém byly objasněny základní parametry a vlivy spojené se zalévacím procesem epoxidů.

Zejména byl kladen důraz na vlivy vlhkostní, které při vytvrzování epoxidů způsobují nežádoucí vzduchové bubliny, jejichž následkem je nekvalita nejen z estetického, ale také z funkčního hlediska (např. částečné výboje). Dále byl popsán proces sušení, jehož úkolem je snížit množství nežádoucí vlhkosti, čímž by bylo možné docílit větší kvality výrobků.

V experimentální části práce bylo předmětem praktické měření vlhkostí používaných ovinových a prokladových materiálů v daných intervalech během celého procesu sušení. Toto měření bylo realizováno z důvodu vzniku bublin během zalévání přístrojových transformátorů do epoxidu, které by mohly být přisouzeny zejména vlhkosti v ovinových materiálech. I přes to, že měřené bandáže a proklady nejsou používány v elektricky namáhaných částech, je vlhkost v nich obsažená nežádoucí. Při zalévání se tato vlhkost uvolňuje a putuje v podobě bublin směrem vzhůru do momentu, kdy je to vzhledem k viskozitě hmoty možné. Tyto bubliny následně způsobují nežádoucí jevy, jako jsou např. elektrické stromečky, či částečné výboje.

Na základě vynesení grafů v první části měření (Graf 1 - Graf 10) bylo znatelné, že polovina měřených vzorků byla při teplotách 105 °C i 90 °C vysušena během prvních 5 hodin. Z důvodu velkého počtu vrstev materiálů je v reálné situaci výroby přístrojový transformátor přehříván po dobu 7 hodin, což je pro problémové vzorky A, B, D, I a J nedostatečné. Po srovnání sušení při normované teplotě 105 °C s teplotou 90 °C je znatelné, že úbytek vlhkosti u sušení při 105 °C je mírně větší. Avšak v obou případech byly vhodné materiály, tedy vzorky C, E, F, G a H, vysušeny do 5 hodin, tudíž je pro tyto vzorky sušení při 90 °C dostačující a z energetického pohledu úspornější. V případě stanovení vhodných náhrad za problémové vzorky, by bylo časově i energeticky neefektivní, aby byly materiály sušeny značně déle a při vyšší teplotě.

Při prvním měření při 105 °C byla v posledním kroku teplota zvýšena na 135 °C. Toto zvýšení bylo realizováno po 21 hodinách od počátku sušení a trvalo 3 hodiny. Cílem bylo určení těkavých látek v bandážích a prokladech. U většiny průběhů z Graf 1 - Graf 10 došlo u modře značených průběhů k mírnému zvýšení hmotnosti v poslední části. Toto zvýšení mohlo být způsobeno přesušením materiálů, což způsobilo snadnější nasátí vlhkosti či těkavých látek odpařených z ostatních vzorků v době mezi ukončením sušení a vlastním měřením hmotnosti (zejména ze vzorku A, který obsahoval lepidlo).

Z pohledu vysoušení se jevily problematické vzorky A, B, D, I a J. Křivka vzorku A (Graf 1) mohla být ovlivněna vrstvou lepidla na jeho spodní straně. Pro vzorky B (Graf 2) a J (Graf 10) byly pro každý z případů měřeny 2 možné náhradní materiály. Jejich měření bylo součástí druhé části experimentu. K vzorku D (Graf 4) a I (Graf 9) nebyly dostupné žádné náhradní materiály, byly tedy doporučeny jako vhodné k záměně bez určení optimální náhrady.

V případě vzorku B (Graf 2) jde o materiál s póry, ze kterých je problematickou vlhkost obtížné odstranit. V porovnání vzorku B a B1 je tato náhrada zcela nepřijatelná. Ve srovnání s původním vzorkem B je v náhradním materiálu B1 velké množství vlhkosti, která se ze vzorku odpařuje ještě obtížněji než u původního vzorku. V případě náhrady B2 je průběh vysoušení znatelně lepší než u původního vzorku B. Množství vlhkosti obsažené ve vzorku B2 je sice vyšší než ve vzorcích B a B1, avšak její podstatná část je odstraněna během prvních 5 hodin. B2 se tedy jeví jako optimální náhrada ke vzorku B. V reálné situaci výroby byl materiál vysušený za přibližně stejnou dobu jako materiály, které byly označeny za vhodné, na rozdíl od původního vzorku B, ze kterého vlhkost unikala i po 24 hodinách. Srovnání obou náhrad je v Graf 11 a Graf 15.

U vzorku J je obtížné odstranění vlhkosti způsobeno lepenými vrstvami papíru, jimiž je vzorek složen. Po srovnání hodnot v Graf 12 a Graf 16 je zřejmé, že oba materiály J1 i J2 jsou ve srovnání s původním vzorkem J vhodnější. Obsahují menší množství vlhkosti, avšak ani po 24 hodinách nejsou zcela vysušené, což platí i pro původní materiál J. Obě náhrady jsou tedy vhodnější, avšak i přes to by bylo vhodné najít pro vzorek J ještě optimálnější náhradu.

V poslední části bakalářské práce byly naměřené hmotnosti dle vzorce (6.1) převedeny na hmotnostní vlhkost (Graf 13, Graf 14). Tento krok byl proveden z důvodu lepšího srovnání množství počáteční vlhkosti a průběhu jejího vysoušení. Nejvíce vlhkosti obsahovaly vzorky C, E a F. U vzorku F bylo patrné rychlé navlhání i v průběhu měření, kdy se hmotnost materiálu, po přenesení z exsikátoru na váhu, rychle zvětšovala. Naopak nejméně vlhkosti měly vzorky B a D, ze kterých však bylo obtížné tuto vlhkost odstranit. Tyto materiály byly označeny za problémové již v první části měření.

# LITERATURA

- [1] STÝSKALA, V. *Transformátory*. Ostrava, 1998. Skriptum.
- [2] Dielektrika. *Dielektrika* [online]. b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/teordiel.html>
- [3] KUTA, A. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. 1999. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [4] *Vlastnosti, příprava a zpracování epoxidových licích hmot vakuovým a tlakovým litím, ostatní hmoty*. 2006. Brno: ABB technická norma, 2006.
- [5] MICHLÍČEK, P. *Simulace odlévání epoxidu do forem přístrojových transformátorů a senzorů vysokého napětí*. Brno, 2007. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] KORVASOVÁ, I. *Studium mechanismu vytvrzování epoxidových pryskyřic*. Zlín, 1992. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta technologická.
- [7] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scentia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6. EAN: 9788086960296.
- [8] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.
- [9] TRNKA, P., J. PIHERA a M. ŠIRŮČEK. Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. In: *Odborné časopisy* [online]. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni: FCC Public, 2010 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech--10217>
- [10] ŠIRŮČEK, M. *Degradace izolačních systémů točivých strojů - elektrické stromečky* [online]. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická, b.r. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/15-sirucek.pdf>
- [11] MIJOVIC, J. a B. FITZ. *Dielectric Spectroscopy of Reactive Polymers* [online]. 1998. NY: Department of Chemical Engineering, Chemistry and Materials Science, Polytechnic University, 1998 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: [http://novocontrol.de/pdf\\_s/APND2.PDF](http://novocontrol.de/pdf_s/APND2.PDF)
- [12] LUTZ, B. a J. KINDERSBERGER. Influence of absorbed water on volume resistivity of epoxy resin insulators. *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2010, 1-4. DOI: 10.1109/ICSD.2010.5568218. ISBN 978-1-4244-7945-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5568218/>

- [13] ŠEBESTA, P. *Stanovení podílu vlhkosti v elektroizolačních materiálech* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/34148>
- [14] PŘIKRYL, T. *Absorpční charakteristiky namáhaných drážkových izolací* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/17067>. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [15] LIEDERMANN, K. *Klimatotechnologie*. Brno, 2006. Skriptum. Vysokého učení technické v Brně UETE.
- [16] KOCMAN, V. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů - Izolanty A*. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 528 s. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] JUNEK, J. *Konstrukční návrh průmyslové sušárny* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/23778>. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [18] Technical specifications. In: *American Instrument* [online]. Switzerland: Mettler-Toledo GmbH, b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.americaninstrument.com/pdf/0663L-BALANCE.pdf>
- [19] Ecocell 55 - Standard. In: *BMT* [online]. b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz/ecocell-55---standard36?cat=59>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\Phi_1$	[Wb]	Magnetický indukční tok
$E_p$	[V/m]	Elektrická pevnost
$U_p$	[V]	Průrazné napětí
$h$	[m]	Tloušťka izolantu
$j$	[mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Hustota difúzního toku
$gradc$	[mol.m <sup>-4</sup> ]	Gradient koncentrace
$D$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Difúzní koeficient
$w$	[%]	Hmotnostní vlhkost
$m$	[g]	Počáteční hmotnost vzorku
$m_d$	[g]	Hmotnost vzorku po sušení

APG	Automatic pressure gelation
RIM	Reaction injection moulding
TTT	Time – Temperature – Transition

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma zapojení měřicího transformátoru napětí [1] .....	9
Obr. 2: Schéma zapojení přístrojového transformátoru proudu [1] .....	10
Obr. 3: Příprava epoxidové licí hmoty [5] .....	13
Obr. 4: Time-Temperature-Transition Diagram [7] .....	14
Obr. 5: Růst elektrického stromečku v epoxidové pryskyřici [10] .....	15
Obr. 6: Měřené vrstvené vzorky prokladových a bandážovacích materiálů .....	21
Obr. 7: Náhradní materiály vzorku B .....	28
Obr. 8: Náhradní materiály vzorku J .....	28
Obr. 10: Váha METTLER-TOLEDO AT200 .....	34
Obr. 11: Technické parametry váhy METTLER-TOLEDO [18] .....	34
Obr. 12: Vakuový skleněný exsikator .....	35
Obr. 13: Sušárna VENTICELL BMT .....	35
Obr. 14: Technické parametry sušárny VENTICELL BMT [19] .....	36

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Rozdělení vlhkosti vzduchu .....	17
Tab. 2: Naměřená hmotnost vzorků v gramech .....	22
Tab. 3: Naměřená hmotnost vzorků v gramech při teplotě sušení 90 °C .....	29
Tab. 4: Hodnoty hmotnostní vlhkosti v % přepočtené z naměřených dat dle (6.1).....	31

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vynesené grafické průběhy pro vzorek A .....	23
Graf 2: Vynesené grafické průběhy pro vzorek B .....	23
Graf 3: Vynesené grafické průběhy pro vzorek C .....	24
Graf 4: Vynesené grafické průběhy pro vzorek D .....	24
Graf 5: Vynesené grafické průběhy pro vzorek E.....	25
Graf 6: Vynesené grafické průběhy pro vzorek F.....	25
Graf 7: Vynesené grafické průběhy pro vzorek G .....	26
Graf 8: Vynesené grafické průběhy pro vzorek H .....	26
Graf 9: Vynesené grafické průběhy pro vzorek I.....	27
Graf 10: Vynesené grafické průběhy pro vzorek J.....	27
Graf 11: Vynesené grafické průběhy pro náhradní materiál k vzorku B .....	29
Graf 12: Vynesené grafické průběhy pro náhradní materiál k vzorku J .....	30
Graf 13: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti současně používaných materiálů sušených při 105 °C s posledním krokem při 135 °C.....	32
Graf 14: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti současně používaných materiálů sušených při 90 °C.....	32
Graf 15: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti možných náhradních materiálů ke vzorku B .....	33
Graf 16: Vynesené grafické průběhy hmotnostní vlhkosti možných náhradních materiálů ke vzorku J .....	33