



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ V OBLASTI PRŮMYSLOVÉHO SUŠENÍ TEXTILU

EXPERIMENTAL MEASUREMENT IN THE AREA OF INDUSTRIAL DRYING OF TEXTILE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN GUTOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÍTĚZSLAV MÁŠA, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Hlavním cílem této diplomové práce je posouzení klíčových parametrů ovlivňujících rychlost sušení prádla. První část obsahuje stručnou, ale nezbytnou teorii procesu sušení, konkrétně konvekčního procesu sušení v průmyslové údržbě textilu. V práci je uvedena teorie plánování experimentu a návrh experimentu pro měření na kompaktním bubnovém sušiči. Účelem experimentu je vytvoření modelu, díky kterému by bylo možno na základě znalosti vstupních parametrů adekvátně určit čas sušení. Následuje přesný popis provedení experimentu, jednotlivé kroky hodnotí. Dále práce obsahuje výsledný model charakterizující proces sušení. Poslední část práce obsahuje možnou metodiku experimentu na podobných typech sušičů a také doporučení pro měření v provozních podmínkách.

Klíčová slova

Sušení prádla, měření vlhkosti prádla, plánování experimentu, experimentální měření.

Abstract

The main aim of this thesis is to provide and explore main factors that affect a drying process. The first part contains brief description of the drying process and focuses on a convectional industrial drying process. The following section discusses the theory of an experiment planning followed by an experiment design of the compact tumble industrial dryer. The thesis also includes an exact description of the executed experiment, then outputs of the measurements and model characterizing the drying process of the tested dryer. The last part deals with the methodology and recommendations for the measurements in operating conditions.

Key words

Industrial drying of textile, humidity of linen, design of experiments, experimental measurements.

Bibliografická citace

GUTOVSKÝ, J. Experimentální měření v oblasti průmyslového sušení textilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Máši, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30. května 2014

.....
Jan Gutovský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení a mnoho nápadů, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Také bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Kubovi za jeho pomoc při plánování a realizaci experimentu. Další díky patří Ing. Josefu Bednáři, Ph.D. za cenné rady v oblasti plánování a vyhodnocování experimentů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich nezměrnou podporu, bez které bych pravděpodobně studia nedokončil.

Jan Gutovský

OBSAH

Obsah.....	1
Seznam použitých symbolů.....	3
1 Úvod.....	5
2 Technologie sušení.....	6
2.1 Teoretické základy sušení.....	6
2.1.1 Principy sušení	6
2.1.2 Rozdělení vlhkosti textilních materiálů.....	9
2.2 Sušení jako součást prádelenského procesu	10
2.2.1 Kompaktní bubnový sušič.....	11
2.2.2 Kvalitativní popis konvekčního sušiče.....	12
2.2.3 Vlhkost textilu	14
2.2.4 Vlhkost sušicího média	16
2.2.5 Bilanční schéma konvekčního sušení.....	17
3 Experimentální zařízení a sběr dat.....	19
3.1 Popis sušiče a testovací prádlo	19
3.2 Popis měřicí instrumentace.....	21
3.2.1 Teplota.....	21
3.2.2 Hmotnost	22
3.2.3 Ostatní měřicí instrumentace.....	23
3.2.4 Měřicí ústředna a software	24
4 Experiment a tvorba modelu.....	26
4.1 Teorie plánování experimentu	26
4.2 Analýza procesu	28
4.3 Postup experimentu a provedení zkoušek	29
4.3.1 Návrh plánu experimentu	29
4.3.2 Postup při experimentu.....	33
4.4 Analýza výsledků	37
4.4.1 Rozbor v programu <i>Statistica</i>	37
4.4.2 Model – rovnice sušení	41

4.5	Analýza naměřených dat	43
4.6	Shrnutí experimentu	47
5	Metodika měření	48
6	Závěr	51
	Seznam použité literatury	52
	Přílohy	55

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
φ	relativní vlhkost vzduchu	%
$ablock$	počet měření v bloku	-
$acelk$	celkový počet měření	-
b	počet bloků	-
d	průměr bubnu	m
G_{factor}	G-faktor	-
h	entalpie	J
h_s	entalpie suchého materiálu	J
h_w	entalpie vlhkosti	J
m	množství prádla	kg
m_{AIR}	celková hmotnost vzduchu	kg
m_G	hmotnost suchého vzduchu	kg
m_M	hmotnost vlhkého materiálu	kg
m_S	hmotnost suchého materiálu	kg
m_W	celková hmotnost materiálu	kg
m_W	hmotnost vodní páry	kg
n	počet replikací	-
p^0_w	tenze par	Pa
p_w	parciální tlak vody ve vzduchu	Pa
Q	přivedené teplo	J
Q_P	přídavné teplo	J
Q_Z	teplené ztráty	J
RPM	otáčky	ot/min
T	teplota	°C
t	teplota sušícího média	°C
τ	čas	min
X	relativní vlhkost materiálu	%
x	volná vlhkost	%
x_c	celková vlhkost	%
x_r	rovnovážná vlhkost	%
x_v	volná vlhkost	%
Y	absolutní vlhkost vzduchu	%
dolní index	význam	
$central$	vztahující se k experimentu - centrální hodnota	
max	vztahující se k experimentu - maximální hodnota	
min	vztahující se k experimentu - minimální hodnota	
v	vztahující se k bilanci - vzduch	
w	vztahující se k bilanci - voda	

horní index	význam
'	<i>vztahující se k bilanci - před sušárnou</i>
''	<i>vztahující se k bilanci - za sušárnou</i>

1 ÚVOD

S rozvojem lidstva a se zvyšující se životní úrovní obyvatelstva přichází stále větší nároky na spotřebu energií. Neustále rostoucí ceny vedou společnost k opatřením, které se snaží o snižování spotřeby energií. Tento tlak je čím dál znatelnější i v oblasti průmyslového prádelnictví. Proces profesní údržby prádla se skládá z mnoha jednotkových operací, jež se rozhodně považují za energeticky náročné. Údržba prádla zahrnuje jako klíčovou úpravu také operaci sušení. Sušení je energeticky a časově velmi náročný proces a z těchto důvodů si v poslední době vyžaduje čím dál větší pozornost a řešení ohledně energetických úspor, které obecně znamenají úspory finanční.

V oblasti prádelenských provozů je tendence ulehčit a zjednodušit postupy rovněž také pro nedostatek času. Zařízení, která mají své nepopiratelné místo v průmyslových prádelnách, jsou sušiče prádla. Prádlo se v nich usuší během doby, která hraje roli v celkové efektivnosti procesu. Tento čas je možno optimalizovat a dosáhnout tak účinnějšího fungování provozu, což konečném důsledku znamená finanční zisk. Cílem této diplomové práce je posouzení klíčových parametrů ovlivňující proces sušení, kdy měřítkem a kritériem pro samotné sušení je čas. Moderní technologie nabízejí mnoho možností, jak těchto úspor dosáhnout. Ruku v ruce vždy vede poznání takového procesu. Technologie bubnových sušičů je známa přibližně 60 let. I přes tento fakt a mnoho získaných zkušeností se od té doby technologie zásadně nezměnila. Sušiče jsou obecně považovány za energeticky náročné zařízení s nízkou účinností procesu. Bylo zjištěno, že například domácí sušiče v USA spotřebují z celkového využití elektrické energie až 9 % [1]. Toto je velmi zajímavý údaj, na jehož základě je také vhodné se více zajímat o danou problematiku a pokusit se ji optimalizovat.

V posledních letech má rovněž stále větší význam plánovaný experiment, jelikož se stává nezbytným pro zvyšování jakosti a služeb. Plánovaný experiment je účinným nástrojem v průmyslu pro získávání poznatků a dat o procesech a podstatnou měrou jej lze využít i při návrhu nových řešení. Na proces sušení působí řada vlivů a mnoho z nich dokážeme řídit. Tyto klíčové vlivy se nazývají faktory a jedním z cílů této práce je provést experiment a porovnat účinků faktorů a odezvu na proces sušení v kompaktním bubnovém sušiči. Důraz je kladen na přesnější a výstižnější poznání časové závislosti s vazbou na faktory ovlivňující proces sušení. Za pomoci experimentu je snaha o vytvoření matematického modelu procesu sušení, který bude následně schopen precizně odhadnout čas potřebný k ukončení operace sušení v závislosti na vstupních podmínkách. Tyto podmínky jsou v této práci definovány a popsány. Dalším z cílů této diplomové práce je poskytnout metodiku měření tak, aby bylo použitelné v běžné prádelenské praxi a daly z něj vyvozovat závěry pro následnou optimalizaci.

2 TECHNOLOGIE SUŠENÍ

Vzhledem k zaměření práce je nutné se seznámit s teoretickými základy sušení. Sušení neboli odstraňování vody z materiálu, je jedním z nejzákladnějších chemicko-fyzikálních dějů a můžeme se s ním každodenně setkat v průmyslu i v přírodě, ale i také v domácnostech a v běžném životě. Následující podkapitoly se zaměří na teoretické základy sušení a dále představí sušení v kontextu prádelenského provozu.

2.1 Teoretické základy sušení

Sušení nebo také „desorpce vlhkosti“ je proces, při kterém dochází k odpařování látek z materiálu ve stavu plynném, kapalném nebo pevném. Charakteristickou součástí procesu je dodávka tepla, která zajistí odpařování v požadované rychlosti. Nejčastěji se sušením odstraňuje vlhkost z pevných látek. Přenos tepla z okolí k povrchu sušeného materiálu může nastat jako důsledek konvekce, kondukce nebo radiace ve speciálních případech i jejich kombinací [2]. Sušení lze tedy rozdělit z pohledu přenosu tepla: konvektivní, kontaktní, radiální. Tímto se řídí i základní rozdělení přístrojů a zařízení, které na principu sušení pracují a využívají jej (viz následující kapitola).

O sušení musíme hovořit jako o difúzním ději, který je řízen druhým Fickovým zákonem. Vlhký materiál lze považovat za binární směs absolutně suché pevné látky a vody, pro kterou se při sušení používá termín vlhkost. Pokud je příslušný materiál vlhký a začneme jej sušit, z pohledu transportních jevů dochází k následujícím procesům [3]:

Vnější difúze

Vypařování vlhkosti z povrchu látky se děje, díky přenosu energie konvekcí z okolí. Tento proces je závislý na podmínkách okolí (vlhkost, teplota, tlak, rychlost a směr proudění sušícího média) a na velikosti povrchu, který je vysušován.

Vnitřní difúze

Nastává po vytvoření gradientu vlhkosti uvnitř materiálu. Dochází k přesunu vlhkosti z vnitřní části látky k povrchu a k následnému odpaření, kdy se potom jedná o vnější difúzi. Vnitřní difúze závisí na teplotě, obsahu vlhkosti v materiálu a jedná se o funkci fyzikálních vlastností sušeného materiálu.

2.1.1 Principy sušení

Sušení je hojně rozšířené ve všech průmyslových odvětvích a provádí se v různých typech sušáren. Přívodem tepla se cíleně snižuje vlhkost materiálu. V případě sušení textilu se jedná o odstraňování vody z pevné látky. Sušiče lze klasifikovat dle mnoha kritérií. Například dle literatury [4] je můžeme dělit:

- podle způsobu přívodu tepla: vedení, proudění, radiace, mikrovlny
- podle sušícího média, které odvádí vlhkost: vzduch, inertní plyny, spaliny
- podle charakteru proudění v sušícím prostředí: fluidní lože, proudové, atd.
- podle pohybu sušeného materiálu: mechanické přesouvání, pneumatické přesouvání, sušený materiál je v klidu
- kontinuální/diskontinuální provoz

Pro výběr vhodného sušiče je potřeba zvážit parametry sušeného materiálu, tepelný výkon, provoz a režim sušiče, požadovanou kvalitu vysušení na konci procesu. Dle výše uvedených kritérií rozlišujeme několik principů sušení.

Konvekční sušárny

Přenos tepla i hmoty (vlhkosti) je zajišťován prouděním sušícího média (horkým vzduchem, spaliny). V těchto typech se hojně používá recirkulace sušícího média. Lze rozlišovat dle [5]:

- fluidační - sušící médium prochází vrstvou zrnitého materiálu větší rychlostí než je prahová rychlost fluidace, sušený materiál se nachází ve stavu vznosu; mohou být jedno nebo více stupňové
- pneumatické - sušený materiál je sušen a zároveň transportován plynem, který má vyšší rychlost než je prahová rychlost úletu
- bubnové - sušící plyn proudí podél povrchu sušeného materiálu z jedné nebo obou stran (viz obrázek č. 1)
- pásové - sušící plyn proudí vrstvou hrubších částic uložených na páse, sítu, aj.
- komorové/skříňové
- rozprašovací, aj.



Obrázek č. 1: Ukázka bubnového sušiče Primus T-16 [6].

Kontaktní sušárny

Přenos tepla vedením (kondukce) – přímým kontaktem sušeného materiálu s vyhřívanou plochou. Sušící médium odvádí pouze vlhkost a z tohoto důvodu lze tyto sušárny využívat k šetrnému sušení termolabilních látek při nízkých teplotách a podtlaku. Sušárny jsou děleny na [4]:

- válcové/kalandry - sušený materiál je nanášen na topný válec (viz obrázek č. 2)
- lopatkové - sušený materiál je umístěn v topném bubnu a lopatky napomáhají mísit materiál; bývají ve vakuovém provedení
- sublimační - sušený materiál se zmrazí a z vlhkosti se vytvoří ledové krystalky.



Obrázek č. 2: Ukázka válcového sušiče [7].

Radiační sušárny

Sušení probíhá sáláním, které je emitováno elektro-magnetickým zářením. Jedná se o [4]:

- infračervený ohřev
- dielektrický ohřev - frekvence elektromagnetického pole je 1 až 200 MHz
- mikrovlnné - mikrovlny jsou generované magnetronem na frekvenci 900 MHz nebo 2450 MHz, ohřev zevnitř vypuzuje vlhkost k povrchu.

Jak je patrné z výše uvedeného rozdělení, existuje široká škála typů sušáren. Důvodem je rozmanitost požadavků na sušený materiál. Některé zdroje uvádějí až 70 typů a podtypů sušících přístrojů. Rozdíly mezi nimi jsou především ve způsobu přenosu energie potřebnou k sušení a také způsobem dopravy materiálu. Doba sušení se pohybuje od několika sekund (rozprašovací) k nejvýš jedné hodině v bubnových sušárnách až k denním intervalům v tunelových či pásových sušárnách [4], [5], [8]. Pro účely této práce se zaměříme na bubnové sušiče na prádlo.

2.1.2 Rozdělení vlhkosti textilních materiálů

Popis vlhkosti textilních materiálů je přehledně zpracován v literatuře [3], [8], [9], [10]. Následující podkapitola čerpá především z těchto zdrojů. Vlhkost je základní veličina spojená s procesem sušení. Proto je v této části blíže specifikována pro textilní materiály, jejichž sušení je předmětem praktické části práce. „*Vlhkost mokrého materiálu je kapalný adsorbát vázaný na jeho vnější a vnitřní povrch.*“ (citace z [9])

Textilní materiály mají schopnost adsorbovat či desorbovat vlhkost z okolí nebo do okolí. Vlhkost textilních vláken závisí za normálních podmínek na relativní vlhkosti vzduchu a teplotě okolí. Vlhkost se na textilní materiály váže různými způsoby a vlhkost lze ji rozdělit dle různých pohledů. Můžeme narazit na následující pojmy:

- Adhezní vlhkost
- Kapilární vlhkost
- Rovnovážnou (hygroskopickou) vlhkost
- Bobtnací vlhkost
- Chemicky vázanou vlhkost

Za adhezní vlhkost považujeme takovou, kterou lze odstranit mechanicky, což v praxi znamená ždímáním či odstředováním. Takovou vlhkost tvoří voda, která ulpívá na povrchu vláken a je rovněž zadržována ve volných prostorách textilie a není tedy ve vláknech vázána.

Kapilární vlhkost je naopak ve vláknech textilie vázána kohezními a adhezními silami v kapilárách. Voda se do mikrokapilár a makrokapilár dostane smočením textilie nebo při kontaktu s prostředím o vysoké vlhkosti. Zbytkové odstraňování této vlhkosti se dosahuje (především z mikrokapilár) termickým sušením. V praxi odstraňování této vlhkosti není žádoucí, jelikož dochází k poškození textilu.

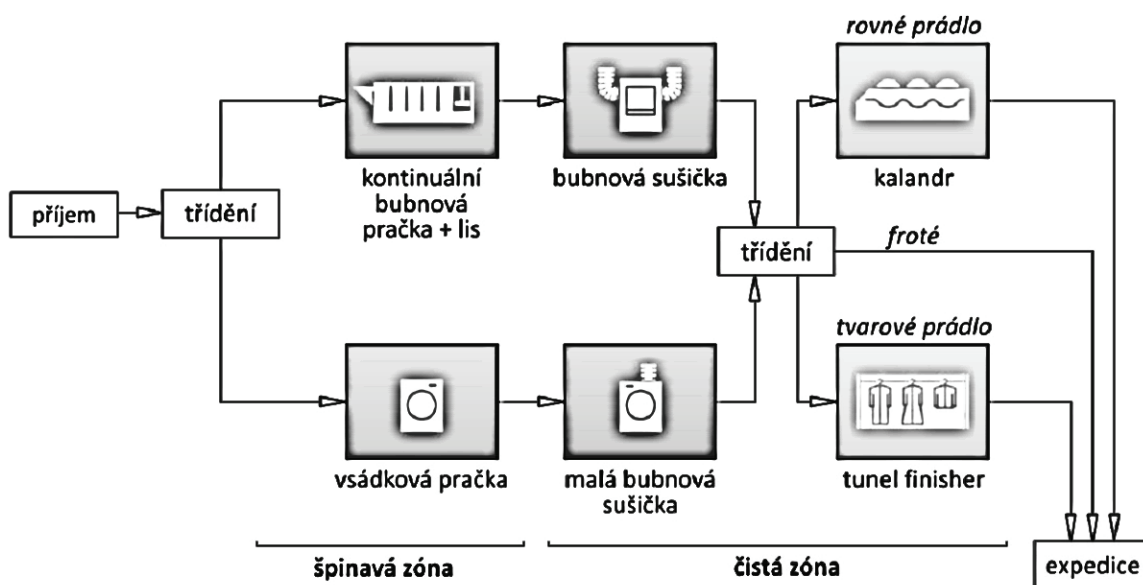
Hygroskopickou vlhkost zapříčiňuje voda, která je vázána ve vláknech textilie z okolního prostředí. Vlákna pojmají jen tolik vlhkosti, kolik je potřeba k dosažení rovnováhy s relativní vlhkostí okolního prostředí. Hygroskopickou vlhkost nelze odstranit mechanicky a je nutné ji převést na páru za teploty vyšší než je teplota nasycených par při daném okolním tlaku, tedy pouze termicky. Z důvodu kvantitativního popsání vlhkosti, se kterou se uvažuje v prováděném experimentu, se tímto také zabývá kapitola 2.2.3.

Vlhkost bobtnací se do materiálu dostává pouze, pokud je materiál v přímém kontaktu s vodou.

Chemicky vázanou vlhkost způsobuje voda tvořící s vlákny chemickou sloučeninu, tzv. krystalickou vodu. Vzniká vazbou vody na vlákna pomocí vodíkových můstků. Tato vlhkost se odstraňuje pouze sušením za vysokých teplot (vyšší než je teplota varu), přičemž je potřeba mít na vědomí, že při tomto sušení může docházet k narušení struktury vlákna a tedy i poškození textilie.

2.2 Sušení jako součást prádelenského procesu

Nyní se zaměříme na konvekční prádelenské sušení a dále klíčové experimentální zařízení - kompaktní bubnový sušič. V průmyslu můžeme o sušících přístrojích hovořit jako o sušárnách, nicméně v prádelenském odvětví je zažitý název sušič. V praxi je proces sušení obvykle pouze jedna z množství operací v celku, jak ukazuje obrázek č. 3. Ten znázorňuje základní operace s nakládáním špinavého prádla. Nejprve se prádlo třídí podle druhu a množství a následně projde procesem praní a odstředění. Poté je prádlo umístěno do sušiče. Prádelny je možno dělit dle zpracovatelské kapacity. Horní cesta znázorněná v obrázku popisuje velké průmyslové prádelny nad 5 tun, spodní cesta pak prádelny menší. Prádelenské sušiče se dělí podle velikosti na sušiče s velkou a malou kapacitou, kde je prádlo zbaveno většiny vlhkosti. Posléze se prádlo přesouvá k poslední operaci před samotnou expedicí, kde se prádlo žehlí. K tomuto slouží přístroje jako je kalandr a tunel finišer. V menších prádelnách je tato operace prováděna ručně.



Obrázek č. 3: Technologické schéma průmyslové prádelny [8].

V reálných provozech se v charakteristickém uspořádání mohou objevovat odchylky ve výkonech jednotlivých technologií, ale obecně se dle uvedeného schématu řídí prádelny veškerých typů, ať už se jedná o prádelny hotelů, ubytoven, nemocnic atd.

V praxi často využívanou možností, jak odstranit zbývající vlhkost v textilu (prádle), je válcový žehlič (kalandr). Jedná se o zařízení, které rovněž zajišťuje žehlení a používá se pro prádlo pravidelného tvaru (ložní prádlo, ubrusy), které tvoří značnou část skladby prádla v komerčních prádelnách [8]. Prádlo procházející kalandrem je vystavováno přímému kontaktu s vyhřívanou teplosměnnou plochou (válcem kalandru) a tudíž dochází k ohřevu prádla a odpařování vlhkosti. Vlhkost je odváděna skrz plášť válce kalandru. Dalším zařízením používaným pro stejný účel je tzv. tunelový finišer. Toto zařízení, na rozdíl od kalandru, slouží pro žehlení tvarového prádla (košile, atd.). Prádlo v přístroji během procesu

projde několika zónami, nejprve je připraveno v parní komoře a následně žehleno. Žehlení a odstraňování zbytkové vlhkosti probíhá pomocí horkého vzduchu, který je přiváděn na prádlo a tímto vyrovnává a načechravá vlákna látky.

Hygroskopická vlhkost prádla závisí na konstrukci a druhu vlákna textilie. Při mechanickém odstraňování vlhkosti dochází především ke zbavení se vody vázané adhezními silami. Různé textilie mají různou vlhkost po odvodnění a následující tabulka č. 1 uvádí schopnost zadržet vlhkost pro některé druhy textilií a taktéž ukazuje, že umělá vlákna jsou schopna pojmout méně vlhkosti oproti vláknům přírodním. To znamená, že jejich sušení bude trvat nejkratší dobu.

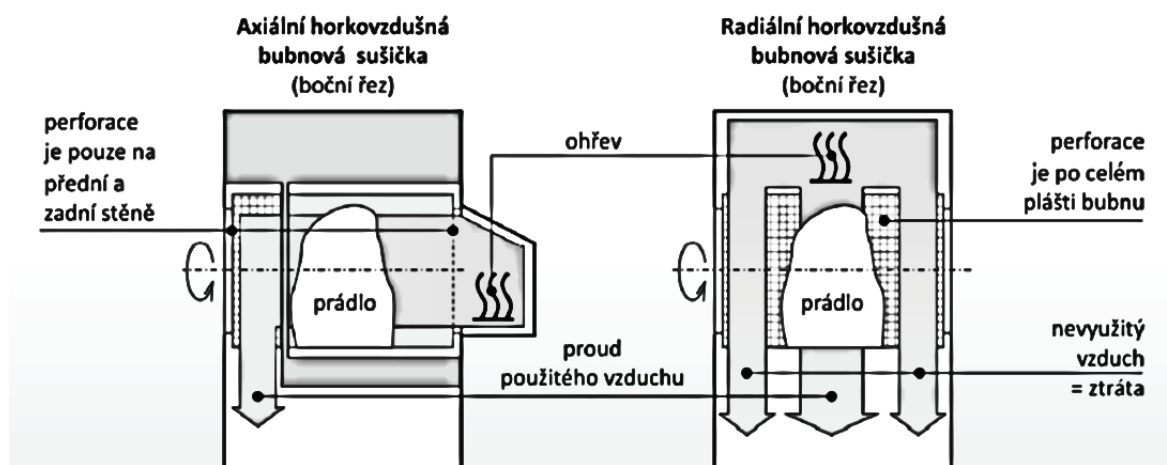
Materiál	Vlhkost [%]	
	Hygroskopická vlhkost (T=20°C, φ=65 %)	Chemicky vázaná vlhkost
Bavlna	7 až 8	3,5
Vlna	13 až 18	8
Hedvábí	9 až 10	4,5
Polyamid	4 až 4,5	2,4
Polyester	0,3 až 0,4	-

Tabulka č. 1.: Vlhkosti zadržované různými druhy materiálu [8].

2.2.1 Kompaktní bubnový sušič

Vzhledem k zaměření této práce je v této podkapitole podrobně představen kompaktní bubnový sušič, který posloužil jako klíčové zařízení pro realizaci experimentu

Obvyklá doba sušení textilu v tomto přístroji se může pohybovat v časových intervalech od několika minut až do hodiny při náročných sušících procesech. Množství maximální vlhkosti odebrané pomocí bubnového sušiče se pohybuje dle typu a doby sušení mezi 5 až 55 % hmotnosti sušené textilie. Princip zařízení dobře znázorňuje obrázek č. 4. Z obrázku je zřejmé rozdělení bubnových sušičů z konstrukčního hlediska na axiální a radiální. V praxi však existují sušiče, které kombinují oba principy. Jako sušící médium se nejčastěji používá horký vzduch, který se dá ohřívat parou, teplem vzniklým spálením plynu (zemní plyn apod.), či elektricky pomocí topných desek [8].



Obrázek č. 4: Typ bubnových sušičů [8].

V axiálním typu zařízení proudí sušící médium ve směru rotace bubnu. Naopak u radiálního principu proudění prochází médium kolmo k ose bubnu. Radiálním uspořádání se někdy jeví jako o energeticky ztrátovější řešení, jelikož může docházet k nevyužití okrajových částí proudu sušícího média.

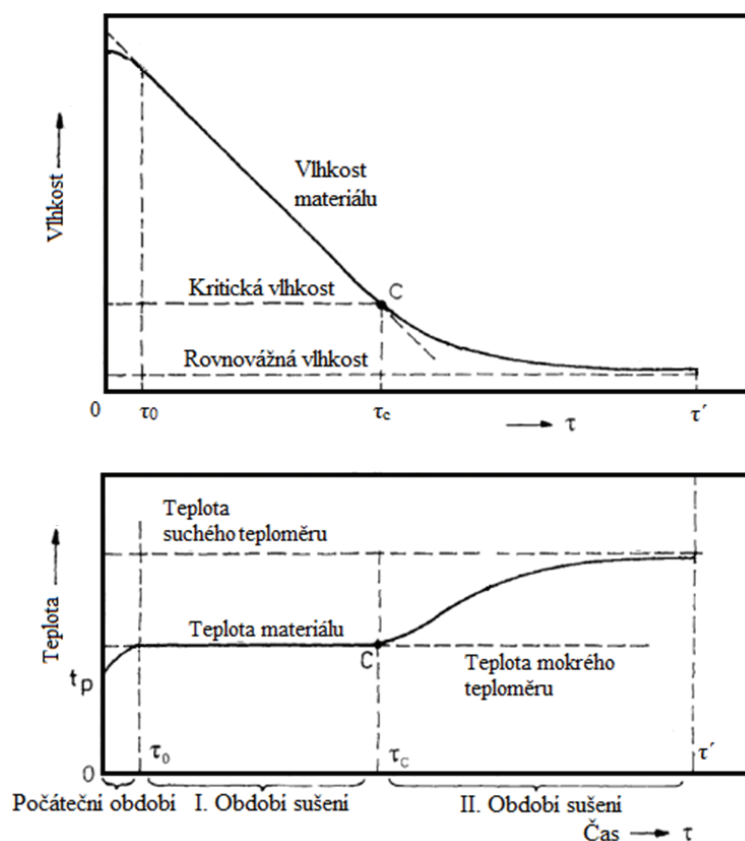
Princip sušiče: odstředěná vlhká textilie (nakládka), kterou je zapotřebí vysušit je nejdříve v bubnu rozvolněna. Proudící horký vzduch nakládku ohřívá a dochází tak k odpařování vlhkosti, která je vázána na textilií. Teplota horkého vzduchu se pohybuje okolo 70 °C, která se volí souladu s udržovacími symboly na prádle.

2.2.2 Kvalitativní popis konvekčního sušiče

Pro kvalitativní popis procesu sušení předpokládáme, že vlákna jsou z počátku celé pokryta tenkou vrstvou vody. Materiál má počáteční vlhkost $W_{ap}[\%]$ a teplotu t_p . V čase $\tau=0$ [s] se materiál dostává do kontaktu se sušícím médiem - horkým vzduchem. Začíná proces sušení, který znázorňuje obrázek č. 5 a popisují je tři následující fáze dle literatury [3]:

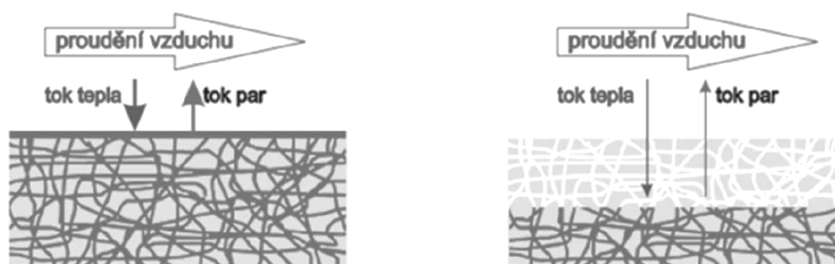
- I. **Počáteční období** – materiál se začíná ohřívát z počáteční teploty na teplotu mokrého teploměru a zároveň se z povrchu začíná odpařovat voda (klesá koncentrace vody v materiálu). Ohřívání materiálu způsobuje zpomalování vysoušení, jelikož spotřebovává tepelnou energii z média. Tato fáze je poměrně časově krátká a někdy je v experimentu těžko měřitelná.
- II. **Období konstantního vysoušení** – v této fázi povrch materiálu dosáhl teploty mokrého teploměru a jeho teplota se nemění a veškeré dodávané teplo se spotřebovává na sušení, tzn. vyrovnává se výparné teplo vody.

- III. **Období klesající rychlosti vysoušení** – povrch materiálu přestává pokrývat vrstva kapaliny a dochází k prvním stykům částic materiálu a média. Rychlost odpařování začíná snižovat a teplota materiálu se zvyšuje nad teplotu mokrého teploměru. Toto zpomaluje sdílení tepla i hmoty a dráha par z materiálu na povrch se stává složitější a tudíž difuzní odpor je větší. V poslední části této fáze dosáhne teplota materiálu téměř teploty sušícího média a vlhkost materiálu je téměř rovna rovnovážné vlhkosti. Děj se zastavuje a materiál v daném prostředí nelze již více vysušit (teoreticky dosažení této rovnováhy trvá nekonečně dlouhou dobu).



Obrázek č. 5: Průběh závislosti vlhkosti a teploty na čase [3].

Zjednodušeně lze popsat celou situaci následujícím obrázkem. První část obrázku popisuje proces, dokud je povrch mokrý. Proces je závislý na rychlosti přestupu tepla a hmoty z materiálu do vzduchu (povrch má teplotu mokrého teploměru). V pravé části je znázorněn proces po vysušení povrchu médiem (v obrázku zaznačeno jako proudění vzduchu) a rychlost celého procesu se zpomaluje z důvodu prodlužování dráhy od vzduchu k vlhkosti obsažené v materiálu (a také z důvodu nižšího teplotního gradientu)[3].



Obrázek č. 6: Konvekční sušení materiálu [3].

2.2.3 Vlhkost textilu

Pro testování procesu sušení je třeba nějak definovat stav vlhkého prádla. Nejdůležitějším parametrem pro vlhkou textilií, je obsah vody a způsob vázání vody. Vlhkost může být vázaná fyzikálně, fyzikálně-chemicky nebo chemicky. V procesu sušení je výhodné množství vody vyjadřovat hmotnostně [9].

- **Relativní vlhkost** - jde o hmotnostní podíl suchého materiálu a vody obsažené v sušeném materiálu (jeho vlhkosti). Za suchý materiál je považován materiál sušený na vzduchu při teplotě 105 °C tak dlouho, dokud není zbaven veškeré volné vlhkosti (neztrácí však svou chemicky vázanou vlhkost) [11].

$$X[\%] = \frac{m_w}{m_s}; \quad (2.1)$$

kde

$$m_w [kg] = m_M - m_s; \quad (2.2)$$

kde $m_M [kg]$ je celková hmotnost vlhkého materiálu a $m_s [kg]$ je hmotnost suchého materiálu.

- **Volná vlhkost** – jedná se o vlhkost, která není vázána materiálem a může se volně pohybovat od buňky k buňce [8]. Zahrnuje množství vlhkosti vázané adsorpcí a absorpcí, vlhkost v makrokapilárách a mikrokapilárách a vlhkost smáčecí. Je dána [9]:

$$x_v[\%] = x_c[\%] - x_h[\%]; \quad (2.3)$$

kde x_c je celková vlhkost jako % hmotnosti absolutně suchého materiálu a x_h je hygroskopická vlhkost jako % hmotnosti absolutně suchého materiálu.

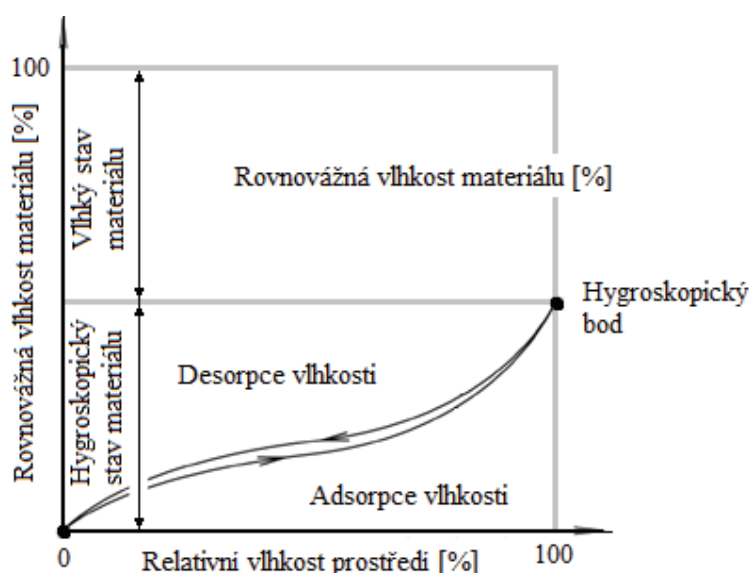
- **Nadbytečná vlhkost** – lze odstranit pouze termickým sušením. Nadbytečná vlhkost se skládá zejména z volné a hygroskopické vlhkosti. Vyjadřuje se:

$$x_n[\%] = x_c[\%] - x_r[\%] \quad (2.4)$$

kde x_r je rovnovážná vlhkost [12].

Z hlediska schopnosti látek pohlcovat vlhkost z okolního prostředí lze také rozlišovat materiál na hygroskopický a nehygroskopický. Nehygroskopický materiál je charakteristický tím, že při libovolné vlhkosti vzduchu má vlhkost materiálu tlak nasycené páry. Za předpokladu, že sušící vzduch není vodní parou nasycen, potom lze z takového materiálu vlhkost zcela odstranit. V hygroskopickém materiálu závisí obsah vlhkosti na vlhkosti a teplotě okolního prostředí [10]. K tomuto se vztahuje i rovnovážná hygroskopická vlhkost:

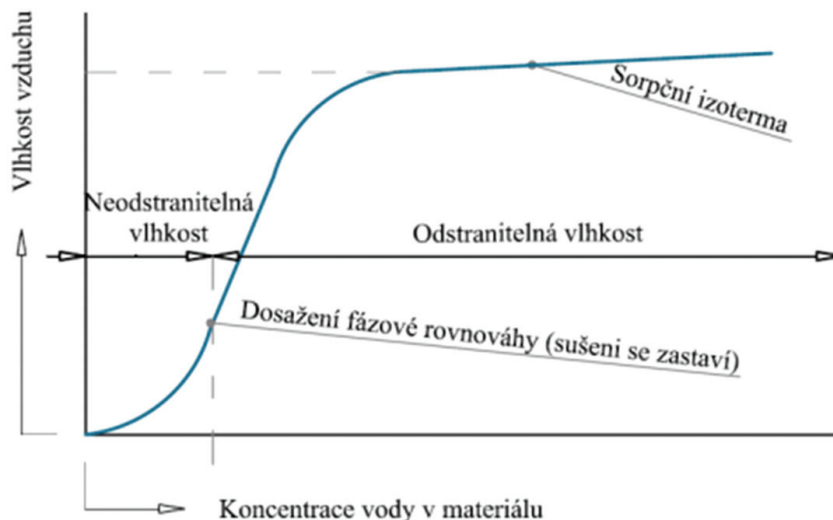
Rovnovážná (hygroskopická) vlhkost – se vyjadřuje sorpční křivkou, která udává, jak moc textilní materiál absorbuje (nebo desorbuje). Při vlhkosti materiálu, která je vyšší než udává sorpční křivka, se vlhkost desorbuje. Opačně tomu je při absorpci. Jestliže se suchý materiál znovu navlhne, rovnovážné křivky vlhkosti jsou proti sobě posunuty a vzniká mezi nimi plocha, tzv. sorpční hystereze (viz obrázek č. 7). Toto posunutí adsorpční a desorpční izotermy je způsobeno naplněním intermicelárních prostorů textilu vzduchem při sušení. Při opětovném zvlhčení nejsou tyto prostory schopny pojmout původní množství vlhkosti a přijímání nové vlhkosti se zpožďuje [8]. Hystereze však není v provedeném experimentu, který tato práce později rovněž popisuje, uvažována, jelikož se jedná o rozdíly malé v rámci kritérií na prováděné měření.



Obrázek č. 7: Závislost hygroskopické vlhkosti na relativní vlhkosti okolního prostředí [8].

Obrázek č. 8 znázorňuje závislost koncentrace vody v materiálu na vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě. Sorpční izoterma znázorňuje, kdy je vlhkost obsažená v materiálu

odstranitelná a též neodstranitelná (i přes fakt, že bude sušení probíhat nekonečně dlouho). Vlhkost odstranitelná je limitována vlhkostí sušícího média [1].



Obrázek č. 8: Závislost koncentrace vody v materiálu na vlhkosti vzduchu [13].

2.2.4 Vlhkost sušícího média

Obvykle se koncentrace vztahují na celkové množství plynu a páry. V procesu sušení je často zvykem vztahovat jednotky na množství plynu, které během procesu zůstává stejné. Ve většině případů se jako sušící médium používá horký vzduch. Vlhký vzduch je směs vodní páry a plynů [9].

- **Absolutní vlhkost** – poměrná hmotnost vlhkosti vlhkého vzduchu a je vyjádřena:

$$Y[\%] = \frac{m_w}{m_g}; \quad (2.5)$$

kde $m_w [kg]$ je hmotnost vodní páry a kde $m_g [kg]$ je hmotnost suchého vzduchu.

- **Relativní vlhkost** – je dána poměrem parciálního tlaku vody ve vzduchu a tenzi vodní páry za dané teploty. Dá se vyjádřit:

$$\phi[\%] = \frac{p_w}{p_w^0}; \quad (2.6)$$

kde $p_w [Pa]$ je parciální tlak vody ve vzduchu a $p_w^0 [Pa]$ je tlak tenze par.

- **Celková hmotnost vzduchu** - je dána

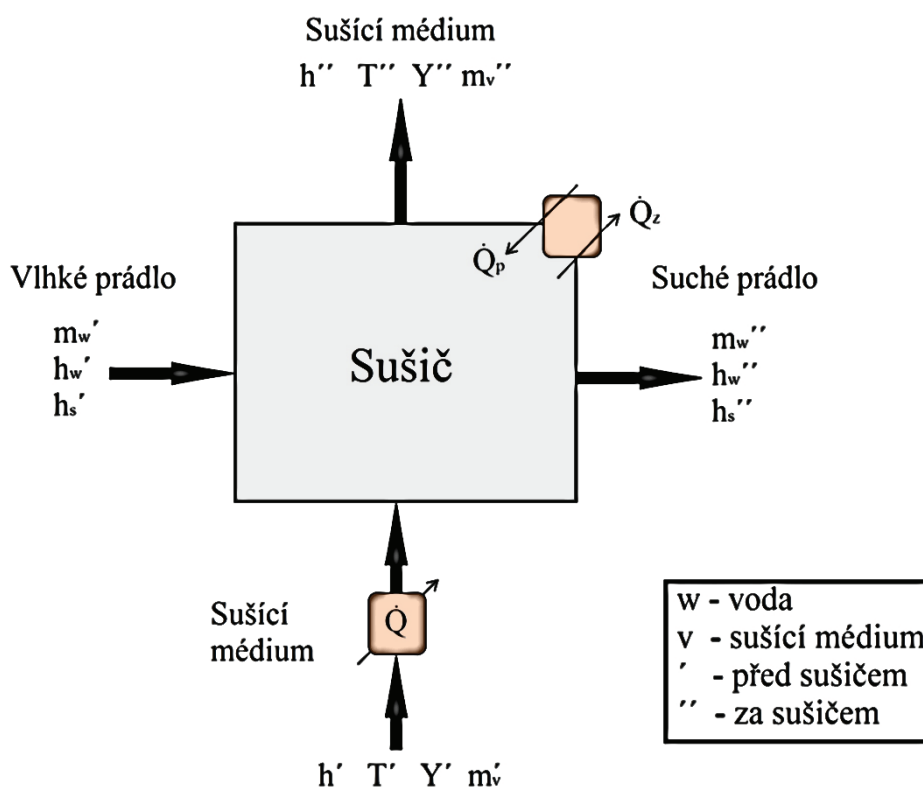
$$m_{AIR} [kg] = m_g + m_w = m_g \cdot (1 + Y). \quad (2.7)$$

2.2.5 Bilanční schéma konvekčního sušení

Statistika sušení zahrnuje materiálové a tepelné bilance teoretické sušárny. Za sušící médium je považován horký vzduch. Následující text se týká teoretické sušárny a dokazuje, že proces sušení závisí pouze na vstupech a výstupech v bilanci. Toto je důležitý předpoklad pro experiment popsáný v následující kapitole [12].

V prostředí se nachází vlhký materiál o vlhkosti m'_w [kg], s entalpií volné vlhkosti h'_w [J]. Hmotnost suchého materiálu je m'_s [kg] a jeho entalpie h'_s [J]. Do systému vstupuje sušící horký vzduch o teplotě T' [°C], hmotnosti sušícího média - suchého vzduchu m'_v [kg], absolutní vlhkosti Y' [%] entalpii h' [J] a předávající teplo $\dot{Q}$ [J]. Uvažuje se, že do procesu je dodáváno i přídavné teplo $\dot{Q}_p$ [J] [12], [14].

Na výstupu je usušený materiál o vlhkosti m''_w [kg], hmotnosti m''_s [kg], entalpií suchého materiálu h''_s [J] a entalpií vlhkosti h''_w [J]. Z prostředí potom odchází vlhký vzduch s parametry hmotnost suchého vzduchu m''_v [kg], teplotou T'' [°C], entalpií vlhkého vzduchu h'' [J] a absolutní vlhkostí Y'' [%]. Rovněž se uvažují ztráty a to únik tepla $\dot{Q}_z$ [J]. Následující schéma zobrazuje samotnou bilanci.



Obrázek č. 9: Schéma bilance [13].

Po definování vstupních a výstupních proměnných můžeme psát hmotnostní bilanci jako:

$$m'_S + m'_W + m'_V \cdot (1 + Y') = m''_S + m''_W + m''_V \cdot (1 + Y''). \quad (2.8)$$

Předpokladem je, že hmotnost suchého materiálu a suchého vzduchu jsou konstantní, tedy:

$$m'_S = m''_S = m_S \quad (2.9)$$

a

$$m'_V = m''_V = m_V. \quad (2.10)$$

Dalším předpokladem je, že materiál dosáhne stavu úplného vysušení:

$$\frac{m_V}{m'_W} = \frac{1}{Y'' - Y'}. \quad (2.11)$$

Pro tepelnou bilanci platí:

$$m'_S \cdot h'_S + m'_W \cdot h'_W + m'_V \cdot h' + \dot{Q} + \dot{Q}_P = m''_S \cdot h''_S + m''_W \cdot h''_W + m''_V \cdot h'' + \dot{Q}_Z. \quad (2.12)$$

Z důvodu teoretické úvahy se předpokládá, $\dot{Q}_P = 0$ a $\dot{Q}_Z = 0$. Dále se uvažuje, že entalpie suchého materiálu je konstantní $m'_S \cdot h'_S = m''_S \cdot h''_S$ a hmotnost suchého rovněž $m'_V = m''_V$. Potom lze předešlou rovnici upravit na:

$$m'_W \cdot h'_W + m'_V \cdot h' + \dot{Q} = m''_W \cdot h''_W + m''_V \cdot h''. \quad (2.13)$$

Při výše uvedeném předpokladu úplného vysušení materiálu $m''_W = 0$. Entalpie volné vlhkosti je vůči výparnému teplu zanedbatelná tedy $h'_W = 1$. Poté má bilance tvar:

$$\frac{\dot{Q}}{m'_W} = \frac{m_V}{m'_W} \cdot (h'' - h') \quad (2.14)$$

a následně v kombinaci s materiálovou bilancí je možno odvodit:

$$\dot{Q} = m'_W \cdot \frac{h'' - h'}{Y'' - Y'}. \quad (2.15)$$

Z výsledků bilancí lze tvrdit, že k odpaření daného množství vody je třeba teplo, které je závislé na entalpii, absolutní vlhkosti horkého vzduchu před procesem a po procesu a také hmotnosti vody, kterou je nutno odpařit. Rovněž z rovnic vyplývá, že materiálová a tepelná bilance teoretické sušárny výhradně závisí na počátečních a koncových podmínkách.

Ze vztahu je možné určit proces ovlivňující faktory – veličiny, které a ty je vhodné sledovat v následném experimentu. První je hmotnost vody obsažené v prádle, tedy vlhkost. Vlhkost bude tedy měřena před procesem po procesu sušení. Také záleží na teplotě a entalpii sušícího média, tedy tepla, které je do systému přiváděno. Jelikož se však jedná pouze o ideální bilanci sušárny, bude jako poslední faktor bráno množství, tedy hmotnost prádla.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ A SBĚR DAT

Před provedením experimentu je potřeba se seznámit se zařízeními, se kterými se bude v průběhu pracovat a na jejichž vlastnostech bude závislý sběr dat při měření. Experimentálním zařízením se rozumí přístroje, měřidla, popřípadě vše co je během v průběhu experimentu využíváno, včetně samotného sušiče.

3.1 Popis sušiče a testovací prádlo

Zkoumané zařízení je výrobek společnosti *Primus*, která se zabývá výrobou prádelenských technologií. Jedná se o průmyslový stroj označený T-16 (obrázek č. 1). Tento kompaktní bubnový sušič kombinuje proudění vzduchu v radiálním i axiálním směru, což teoreticky zvyšuje účinnost sušení. Sušicí médium je ohříváno pomocí elektrických topných těles. Další informace o přístroji shrnuje níže uvedená tabulka č. 2.

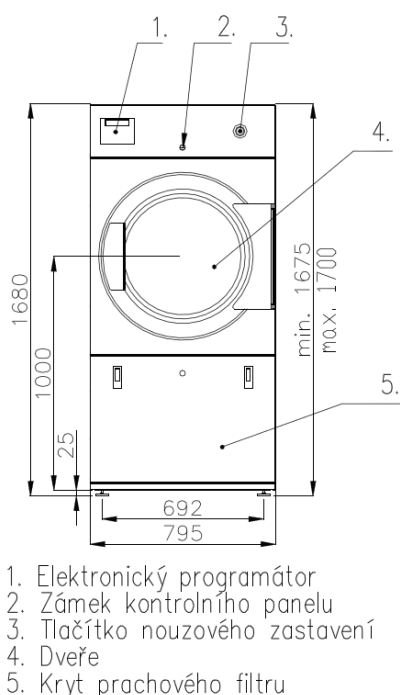
Řídicí systém přístroje umožňuje manuálně nastavit teplotu sušicího vzduchu, hodnotu vlhkosti, při kterém se má proces sušení zastavit a také čas chlazení (cooling). Prádlo se musí po končení sušení zchladit z vysoké teploty na nižší z bezpečnostního důvodu. Dosahuje se toho vypnutím ohřevu při zachování přívodu vzduchu. Tato funkce se nastavuje a spouští vždy, když čidlo vlhkosti umístěné v sušiči zaznamená, že vlhkost prádla dosáhla konečné hodnoty (více informací o čidlech jsou uvedeny v následujících podkapitolách).

TYP		T 16
KAPACITA		
Kapacita bubnu	kg	16
Objem bubnu	l	345
Průměr bubnu	mm	Ø760
Počet bubnů		1
Počet dveří		1
PRŮTOK VZDUCHU	m ³ /h	830-940
PRŮMĚR SUŠENÍ	g/min	300
MOTORY		
Ventilátor	kW	0,55
Pohon	kW	0,25
ELEKTRICKÝ OHŘEV		
Elektrické připojení		
Příkon	kW	24,0
PROGRAMÁTOR		
Easy control - antivandal		Standard
Full control		K dispozici
ODTAH	mm	
ROZMĚRY		
V×Š×H	mm	1680×795×1280
TRANSPORTNÍ ÚDAJE		
Hrubá hmotnost	kg	270
Čistá hmotnost	kg	250
Rozměry balení V×Š×H	mm	1785×855×1310

Tabulka č. 2: Základní údaje bubnového sušiče [6].

Ze sušiče během procesu odchází vlhký horký vzduch (maximální teplota je 70 °C) a ten může obsahovat prach (zbytky textilie, prachu apod.). Tento vedlejší efekt může způsobit požár, a proto se vzduch odvádí kouřovodem, který ústí do ovzduší. Ke svému chodu používá sušič vzduch odsátý z místnosti a je tedy nutné, aby byl umístěn ve větraných prostorech. Odvodní potrubí (kouřovod) má světlost 250 mm, aby bylo zajištěno optimální proudění vzduchu požadované výrobcem, a to 600 m³/h s dovolenou tlakovou ztrátou v potrubí 260 Pa. Na obrázku č. 10 lze vidět schéma přístroje i s rozměry.

Nevýhodou řídicího systému je, že nedokáže odhadnout a tudíž neukazuje na displeji čas, kdy bude proces ukončen (běžné sušiče, které čas ukazují, v průběhu procesu odpočítávaný čas mění a výsledný rozdíl je často v řádech desítek minut). Náročnost určení této doby je dána složitostí takového odhadu a toto je jeden z důvodů, proč se tímto problémem tato práce zabývá.



Obrázek č. 10: Schéma sušiče [6].

Při experimentu bylo použito froté prádlo. K dispozici bylo 105 kusů bílých froté ručníků o průměrných rozměrech 65x130 cm. Velikost jednotlivých kusů se může mírně lišit, a to například i z důvodu, že samotný proces sušení textilií deformuje, ale ovšem toto nemá vliv na experiment. Medián hmotnosti všech kusů textilie byl 465 gramů (opět minimální rozdíly v gramáži textilií nejsou podstatné). Tabulka č. 3 všechny údaje o textilií shrnuje. Ručníky byly před experimentem vyprány s chemickými pracími prášky (předpírka, hlavní praní, máchání, odstředění). Toto je před experimentem vyžadováno, jelikož po prvním vyprání může textilie změnit své parametry.

Gramáž	<500; 550>	g/m ²
Materiál	bavlna, froté	%
Varianta	ručník, bílá	-
Velikost	65 x 130	cm

Tabulka č. 3: Parametry textilie

3.2 Popis měřicí instrumentace

Práce je zaměřena na popis závislosti času sušení na sušicí teplotě, vstupní vlhkosti prádla a jeho hmotnosti. Popis uvedených veličin vyžaduje adekvátní vybavení pro sběr a archivaci dat. Hlavní sledovanou veličinou byla doba sušení. Pro potřeby experimentu byl čas zaznamenáván standartními digitálními stopkami.

3.2.1 Teplota

Jelikož teplota je jedna z nejdůležitějších veličin v experimentu, je nezbytné znát způsob jejího měření, popř. umístění snímačů. Teplota je měřena na třech místech, třemi různými teploměry.

Teploměr v sušiči – NTC termistor

Údaje o teplotě pro program řídící proces sušení získává čidlo NTC umístěné v přístroji. Následně program určuje, zda má aparát ohřívat sušící médium (vzduch). Řízení probíhá dvoustavově. Pokud je teplota nízká, topná deska začne ohřívat vzduch a když je následně teplota vyšší než je požadovaná teplota vzduchu, ohřev se vypne.

Měření termistoru je založeno na závislosti odporu na změně teploty, podobně jako Pt (a jiné kovové) teploměry. Na rozdíl od Pt a jiných kovů je princip vodivosti polovodičů odlišný. Vedení elektrického proudu v kovech zajišťuje pohyb valenčních elektronů. S rostoucí teplotou se elektrický odpor materiálu bude snižovat. Termistor typu NTC využívá obrácenou charakteristikou vodivosti [15]. NTC snímač instalovaný v přístroji má přesnost 10 k $\pm$ 1 % a měřicí rozsah -50 °C +110 °C.

Odporový teploměr

Teplota horkého vzduchu se měří na odtahu z přístroje – v odvodním potrubí, kde je snímač teploty umístěn v jímce ve výšce 1 m nad zemí (viz obrázek č. 12). Jedná se o platinový (Pt) teploměr. Pt teploměry fungují na principu změny odporu kovů v závislosti na teplotě, jsou to tedy odporové teploměry.

Teploměr je výrobkem firmy *Sensit*, typ *PTS 65-100*. Třída přesnosti použitého teploměru odpovídá typu A dle ČSN EN 60 751, $\Delta t = \pm (0,15 + 0,002|t|)$ ve °C. Teploměr má měřicí rozsah od -50 °C až do 250 °C s chybou měření maximálně 0,5 °C. Doba odezvy Pt teploměru je τ 0,5 < 9 s (měřeno v proudící vodě 0,4 m.s⁻¹) [16].

Termočlánek

Dalším použitým teploměrem je termočlánek, který je také zaveden do odtahového potrubí. Oproti Pt teploměru je termočlánek umístěn ve větší vzdálenosti od sušiče a to ve výšce 3,2 m od výfuku stroje. Tato vzdálenost od začátku potrubí už by měla zajišťovat ustálený tok horkého vzduchu. Termočlánek pracuje na principu Seebeckova jevu, kdy se při měření využívá termoelektrické napětí vznikající v termočlátku.

3.2.2 Hmotnost

Hmotnost rovněž patří veličiny, jejíž znalost, respektive znalost použitého měřidla jsou v provádění experimentu nezbytné. Hmotnost také úzce souvisí s určením měrné vlhkosti textilie, která se dá jednoduše spočítat poměrem hmotnosti suché/vlhké textilie.

V experimentu je důležité určit relativní vlhkost z hmotnosti celkové nakládky. Údaje o hmotnosti textilie jsou získávány dvěma způsoby: za pomoci tenzometrů a nájezdové váhy.

Nájezdová váha

V počtu měření a množství v jakém byla textilie vážena, je pro experiment tato volba zjišťování hmotnosti naprosto oprávněná. Zjištění hmotnosti pomocí nájezdové váhy často probíhá v kombinaci s vozíkem nebo kontejnerem, který se umístí (vjede) na plošinu a měří se hmotnost i s vozíkem jehož hodnota se následně odečte od celkové hmotnosti.

Použitá váha (viz obrázek č. 11) s výškou nájezdu 55 mm váží s přesností 0,05 kg a její měřicí rozsah je do 200 kg [17].

Výpočet vlhkosti z hmotnosti relativní vlhkost je dán následujícím vztahem (2.1), již také uvedeným v kapitole 2.2.3.



Obrázek č. 11: Nájezdová váha [17].

Sestava pro vážení tenzometrickými snímači

Princip tenzometru je založen na deformaci tenkých drátků, které jsou umístěny na vhodném místě a ve vhodném směru. Na drátky působí síla (gravitační síla z nakládky textilie) a následná deformace mění průměr (tvar) drátku a s tímto se mění i jeho elektrický odpor. Odpor se měří a z něj pak převodníkem vyhodnocuje síla zatížení – tedy hmotnost.

Tenzometry jsou umístěny přímo na nožkách sušiče. Nevýhodou tohoto umístění je, že po každém sušicím cyklu je tenzometr, díky rotaci bubnu, rozladěn a je nutné jej opět nastavit na nulu. Nicméně hodnoty jsou zaznamenávány průběžně a lze je následně vyhodnotit.

Jak již bylo zmíněno, tenzometrické snímače jsou umístěny na všech čtyřech nožkách sušiče, na kterých přístroj stojí. Ty jsou potom napojeny na jeden napěťový a proudový transponder. Jednotlivý tenzometr má měřicí rozsah do 250 kg, což znamená 4 x 250 kg. Rozlišení vážení pro celou sestavu je maximálně 0,05 kg.

3.2.3 Ostatní měřicí instrumentace

Čas jako hlavní veličinu je relativně jednoduché zaznamenat. Jelikož čas byl sledovaný v jednotkách minut, plně postačuje použití běžné digitální stopky. Ostatní instrumentace se týká měřidel, která například upřesňují okolní podmínky (předpokládají se konstantní podmínky), popřípadě veličiny, které se mohou stát důležitými až po provedení experimentu. Pro provedení experimentu není většinou nezbytně nutná jejich přesná znalost, ale je dobré mít o nich přehled.

Vlhkost

V experimentu je zaznamenávána hodnota vlhkosti na odtahu sušicího média (jedná se však o metodu nepřímou). Jak bylo zmíněno, vlhkost materiálu úzce souvisí s jeho hmotností a takto je i v experimentu vypočítávána. Vlhkost je zjišťována dvěma způsoby, a to pomocí měřicí sondy, která obsahuje vlhkoměr i termočlánek. Výrobce termočlánku je *Rotronic* a termočlánek je součástí sondy, která je schopna zároveň měřit i vlhkost. Nicméně zaznamenávány jsou jen údaje o hodnotách vlhkosti a teploty. Čidlo je umístěno v odvodním potrubí ve výšce 3,5 m nad zemí (viz obrázek č. 12). Je důležité si uvědomit, že v tomto případě se nejedná o vlhkost textilie, ale vlhkost sušicího média, které už bylo v kontaktu se sušenou textilií. Přesnost měření je $\pm 0,8$ % celkové relativní vlhkosti s měřicím rozsahem 0 do 100 % relativní vlhkosti [18].

Prandtlova trubice

Prandtlova trubice je tenká dvouplášťová trubice, umístěná proti směru proudění plynu (v odvodním potrubí). Měření využívá rozdílu celkového (dynamického a statického) a statického tlaku zjišťovaného trubicí uvnitř systému a měřeného dále na diferenčním manometru.

V případě sušiče je potřeba zaručit dostatečný průtok sušicího vzduchu v odvodním potrubí. Toto se dá ověřit Prandtlovou trubicí. Použitá trubice je z nerezové oceli, typ 622 s rozměry 483 × 8 mm (délka × $\varnothing$ trubky). Vyvolané tlakové změny jsou převedeny na analogový signál a následně do měřicí ústředny, kde jsou data zaznamenána. Přesnost převodníku je s maximální chybou 0,25 %. Měření je možné v kanálu až do průměru DN 300 a teploty do 180 °C [19].

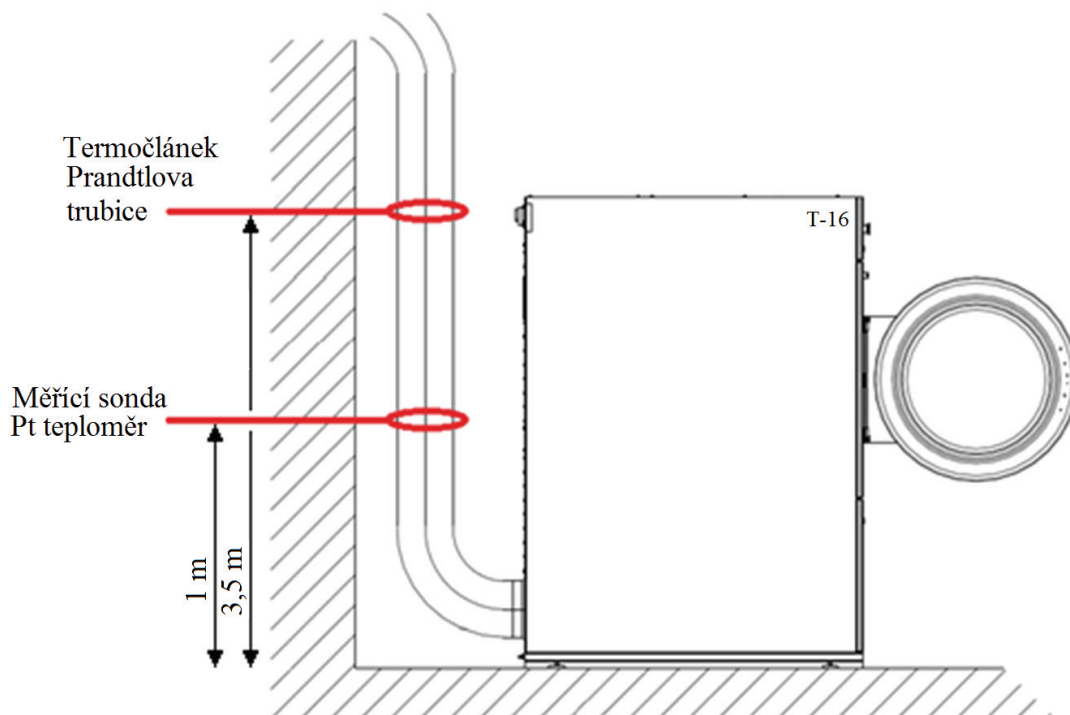
Měřicí stanice okolních podmínek

Veličiny jako teplota, tlak a vlhkost okolního vzduchu je důležité znát skoro při jakémkoliv laboratorním experimentu. Prostorová čidla pro měření těchto veličin jsou vyrobena firmou *Comet* [20].

- Teplota je měřena s maximální chybou 0,5 °C
- Relativní vlhkost je zjišťována s maximální chybou 2 % při teplotě 23 °C
- Čidlo měření atmosférického tlaku pracuje v měřicím rozsahu 800 až 1100 hPa s maximální chybou 2,5 hPa (při teplotě vzduchu 5 až 45 °C).

Měřič spotřeby elektrické energie

Průmyslový analyzátor sítě zaznamenává změnu elektrických veličin. Jedná se o typ 96 společnosti *Schrack*. Analyzátor je schopen měřit kromě napěťových a proudových veličin (s přesností 0,5 %) také celkový (činný, jalový, zdánlivý) výkon a jeho střední a maximální hodnotu [21].



Obrázek č. 12: Schéma umístění čidel.

3.2.4 Měřicí ústředna a software

Pro sběr dat jsou důležité nejenom parametry snímačů, ale i měřicí ústředny, které slouží pro zpracování naměřených hodnot. V případě popisovaného experimentu naměřená data zaznamenává měřicí ústředna připojená ke snímačům. Jedná se o ústřednu výrobce *Delphin*,

typ *ProfiMessage*. Zařízení funguje na bázi PLC určené pro regulaci a měření v průmyslovém prostředí s možností umístění vstupních/výstupních modulů v oddělených rozvaděčích. Rozhraní počítačové sítě je Ethernet (LAN). Vzorkovací frekvence pro každý kanál je minimálně 2 Hz a rozlišení A/D převodníku analogových vstupů je minimálně 16 bitů. Software *ProfiSignal*, kterým se obsluhuje (ukládání dat, ovládání, vizualizace dat) měřicí ústředna je plně kompatibilní se systémem Windows [22].

4 EXPERIMENT A TVORBA MODELU

Cílem je navrhnout a provést experiment na vybraném sušiči a následně na základě získaných dat vytvořit model, který by adekvátně popisoval proces sušení.

Plánovaný experiment je zkouška, kterou provádíme záměrně za účelem zjištění výstupních hodnot z procesu, které jsou závislé na hodnotách vstupních a jejich změně. Samotný experiment se skládá ze dvou částí: vlastní plán experimentu a následně statické vyhodnocování plánu experimentu, které je přímo závislé na plánu experimentu. Plánování experimentu zahrnuje navržení uspořádání měření a také způsob vyhodnocování jeho výsledků. Základem je odpovídající znalost problému s představou jaké výsledky můžeme očekávat a také kritický pohled, kde může nastat „slabé místo“ při vyhodnocování výsledků. Smyslem experimentu je získat příslušná data v náležité kvalitě a rozsahu s cílem daný proces lépe poznat, popřípadě zlepšit. Každý experiment obsahuje následující fáze [23], [14]:

- analýza procesu
- plánování experimentu
- provedení zkoušek ve stanoveném pořadí
- analýza výsledků
- závěry a vyhodnocení.

Obecně existuje mnoho způsobů, jak navrhnout experiment a každý z nich je vhodný pro jiné řešení statistického zpracování a vyhodnocení. Náplní této diplomové práce není ovšem popsat veškerou teorii navrhování experimentů, a proto jsou uvedeny pouze základní informace a je konkrétněji popsán jen daný prováděný návrh experimentu.

4.1 Teorie plánování experimentu

Navrhování experimentu je proces, při kterém se snažíme zvolit strategii pro průběh experimentu tak, aby byla dosažena požadovaná kvalita žádoucích závěrů. Tato volba závisí na druhu otázky, která se má zodpovědět na stupni, jenž se přisuzuje závěrům a na prostředcích, které jsou k dispozici. Vhodně navržený a provedený experiment obvykle vede ke statistické analýze a následné interpretaci výsledků. Plánovaný experiment tvoří metodologii volby v celé složitosti, proměnlivosti a provázanosti uspořádání. Faktoriální experimenty poskytují metodologii pro poznání vzájemných vztahů mezi více faktory ovlivňující výstupy. Typy mohou být mnohem účinnější a užitečnější než intuitivní experimenty, v nichž se faktory studují odděleně. Je-li počet faktorů nevhodně velký, následně mohou být tyto experimenty nepřiměřeně nákladné, což se však netýká otázky řešené touto diplomovou prací [23].

Při plánování experimentu je nezbytné omezit strannosti, které mohou a jsou vnášeny experimentálními podmínkami do samotného experimentu a posléze do výsledků experimentu. Snížení těchto rušivých nežádoucích prvků se dosahuje pomocí znáhodnění jednotlivých měření a také seskupováním do bloků [23].

Důležité je si uvědomit, že přestože mají faktoriální experimenty mnoho předností, jejich nevýhodou je často značně velký počet pozorování. Toto by znamenalo, že by byl experiment zatížen velkým počtem opakováním jednotlivých měření. Faktoriálním experimentem 2^k se dá toto podstatně snížit.

Faktoriální experiment 2^k

Předností takového experimentu je tedy podstatně nižší počet dílčích měření a také to, že lze poměrně dobře odlišit interakce mezi jednotlivými faktory a míru jejich závislosti. Faktoriální experiment 2^k je takový experiment, v němž se společně prošetřuje k faktorů ($k \geq 2$), každý z nich se dvěma úrovněmi [23]. Toto znamená, že se sleduje horní a dolní úroveň při počtu k faktorů. Při tomto experimentu, je důležité odlišit hlavní a vedlejší faktory, které nemají podstatný vliv na odezvu [24]. Faktoriální plány jsou vhodnější pro popis procesu a filtrování faktorů [25].

I přes fakt, že se díky této metodice sledují pouze dvě úrovně tří faktorů, obsahuje experiment velký počet dílčích měření, což je náročné časově, ale také náročné z pohledu udržení konstantních podmínek pro experiment. Proto se nabízí možnost, seskupit experimentální jednotky (měření) do relativně homogenních bloků, kdy se dá očekávat menší experimentální chyba. Tato chyba je menší než chyba, kterou by bylo možno očekávat, kdyby podobnému počtu experimentálních jednotek byla ošetření přiřazena náhodně. S tímto souvisí i randomizace, která vychází z předpokladu vzájemné nezávislosti mezi dílčími měřeními. Randomizace tedy zaručuje náhodnost pořadí v provádění jednotlivých měření [23]. Existuje několik důvodů pro upřednostnění 2^k faktoriálního experimentu a 2^k faktoriálního návrhu [26]:

- je poměrně jednoduchý pro použití a analýzu dat a lze použít grafické metody
- k provedení je zapotřebí relativně málo měření
- splňuje většinu parametrů pro potřebu zlepšování kvality
- dají se jím studovat i komplikované systémy s mnoha proměnnými za použití relativně jednoduchého návrhu, je také vhodný pro postupné testování
- pokud je pozorováno větší množství faktorů, umožňuje návrh udržet plánovaný experiment v rozumném rozsahu

Samotnému experimentu a jeho plánování rovněž předchází příprava přístrojů, měřidel, jejich testování funkce v rámci tématu experimentu, nachystání a zkontrolování ostatních prvků. Toto tedy znamená vyzkoušet na nečisto několik měření a zhodnotit výsledky a ověřit, zda vše funguje správně, popř. zjistit slabá nebo problematická místa a připravit si řešení v případě, že nechtěná situace nastane. Tímto se dá předejít vzniku nepředpokládaných komplikací při „ostrém“ měření v průběhu experimentu.

4.2 Analýza procesu

Cílem experimentu je u výše uvedeného sušiče zjistit celkový čas sušení v závislosti na použité teplotě sušícího vzduchu, hmotnosti vody obsažené v prádle (vlhkost) a množství sušeného prádla. Jak již bylo výše uvedeno, sledované hodnoty jsou měřeny externě. Během experimentu jsou uvažovány následující veličiny jako důležité, respektive proces nejvýrazněji ovlivňující (samozřejmě také v případě reálného průmyslového sušení textilií). Všechny ostatní jsou myšleny jako konstantní, případně proces neovlivňující, popřípadě jen zanedbatelně. Tyto předpoklady vycházejí z teorie uvedené v druhé kapitole. V experimentu jsou za proměnné považovány následující veličiny:

- Teplota sušícího média
- Hmotnost použité textilie
- Počáteční vlhkost textilie (podíl množství vody na množství prádla)
- Celkový čas procesu sušení

Ze zmíněných veličin se za závislou proměnnou pokládá pouze čas a zbylé jsou považovány za nezávislé proměnné. Z výše uvedených předpokladů vyplývá logicky návrh a plán experimentu, který je popsán v následující podkapitole. K dosažení zmíněného cíle experimentu a taky této práce je vhodné uvažovat, co může nastat, když se mění jednotlivé následující uvedené faktory.

Změna teploty

Zvyšováním teploty sušícího média bude docházet k většímu teplotnímu gradientu mezi prádlem a sušícím médiem a tedy k rychlejší výměně hmoty a energie. Následkem bude, že voda bude snadněji a v kratším čase odváděna z textilie do sušícího vzduchu. Lze tedy říci, že se zvyšující teplotou sušícího média, se zkrátí čas potřebný k vysušení textilie.

Změna vlhkosti textilie

Větší množství vody obsažené v textilií znamená potřebu delšího časového úseku pro ohřev vody obsažené v prádle a poté odvod vody z textilie do sušícího média. Čím nižší počáteční vlhkost, tím kratší čas sušení.

Je vhodné zmínit, že vlhkost, kterou zde uvažujeme, a která odchází z prádla během sušení v experimentu, je především vlhkost adhezní (viz kapitola 2.1.2 a také tabulka č. 1).

Množství použité textilie

Toto je faktor, jehož vliv je nejtěžší určit. Všeobecně se míní, že s větším množstvím použité textilie v přístroji se komplikuje cesta odcházející vodě z textilie. Toto znamená, že s větším množstvím textilie stoupá čas vysoušení.

Během provádění experimentu se mohou vyskytnout další faktory, které mohou ovlivnit měření (nepředpokládá se však, že by tato situace nastala). Očekávaná mohou být menší ovlivnění jednotlivých měření, a to vedlejšími faktory. Mezi tyto faktory se dá považovat

nestabilní teplota a nepřesný počáteční bod vlhkosti, popřípadě množství textilie a také fakt, že textilie není homogenním materiálem a během sušicího procesu se míchá a převrací. Toto výsledky může ovlivnit a z tohoto důvodu se jednotlivá měření opakují.

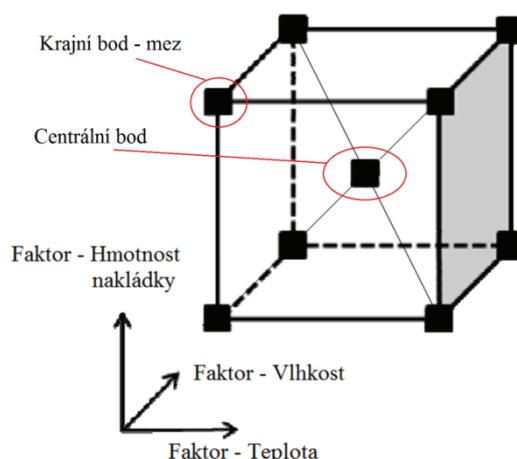
4.3 Postup experimentu a provedení zkoušek

Doposud uvedené informace se týkaly teorie sušení, teorie plánování experimentu a také byla popsána použitá měřicí technologie. Následující podkapitola popisuje plán experimentu a popis provedení experimentu. Je nutné si uvědomit, že měření se týká jednoho konkrétního přístroje a bude prováděno s jedním typem textilu. Z tohoto vyplývá, že výsledné hodnoty a následný model se bude týkat jen daného konkrétního typu přístroje a prádla.

4.3.1 Návrh plánu experimentu

Po teoretickém prozkoumání problematiky sušení z první kapitoly a uvážení situací, které mohou v tomto ději nastat, a rovněž znalosti teorie plánování experimentu můžeme přikročit k samotnému plánu. Vyplývá zde tedy způsob řešení daného experimentu k dosažení požadovaných výstupů. Při uvážení požadavků na cíl/výsledky experimentu, bylo rozhodnuto použít faktoriální experiment, díky kterému lze zkoumat více faktorů najednou a jejich vzájemné interakce.

Jedna z prvních úvah se týká stanovení podmínek, které budou shodné pro jednotlivá měření, a ze kterých bude model vycházet, a které bude následně popisovat. Zjednodušeně řečeno, model musí být schopen popsat situaci v každém bodu uvnitř krychle. Krychle s úrovněmi znázorňuje obrázek č. 13. Krajiní rohové body krychle se považují za meze, které je potřeba definovat. Je tedy nutné si stanovit úrovně – krajiní rohové body. Jak již bylo uvedeno, faktory ovlivňující experiment jsou teplota sušicího média, množství použité textilie, počáteční vlhkost textilie. Celkový čas sušení je veličina, kterou budeme sledovat a považovat za závislý faktor. Což znamená, že ostatní faktory považujeme za nezávislé a u nich jsou definovány předem mezní hodnoty – krajiní body.



Obrázek č.13: Schéma faktorového plánu pro 3 proměnné.

Stanovení úrovní a faktorů

V našem případě jde o experiment dvouúrovňový se třemi faktory. Pro každý nezávislý faktor je volena spodní a horní mez. Pro lepší popsání modelu mezi těmito mezemi je zvolena ještě prostřední mez, tzn. centrální bod. Při této volbě se předpokládá, že model bude popisovat lineární proces mezi těmito mezemi. Je třeba rovněž brát ohled na parametry a možnosti týkající se přístroje – sušiče a také běžnou praxi používání sušiče.

- **Teplota sušícího média** – při stanovování mezních teplot vycházíme z parametrů sušičky. Přístroj umožňuje volitelně nastavit teplotu sušícího vzduchu pouze do teploty 70 °C. Při úvaze sušící praxe je volena nejvyšší teplota z důvodu potenciálního nejrychlejšího průběhu procesu. Nejnižší teplota je brána s ohledem na celý průběh - je to předpokládaná mezní hodnota, kdy má ještě smysl sušit textilií v sušiči.

$$t_{\min} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{central}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\max} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- **Množství prádla** – i při volbě těchto mezí je třeba brát v úvahu parametry přístroje. Sušič je navržen na maximální nákladku 16 kg suchého prádla. Při úvaze průmyslového sušení se málo kdy stane, že je sušič nenaplněn z důvodu úspory energie. Předmětem bylo také zjistit, jak se bude sušič chovat při přeplnění, proto byla zvolena jako horní mez hmotnost textilie 18 kg.

$$m_{\min} = 14 \text{ kg}$$

$$m_{\text{central}} = 16 \text{ kg}$$

$$m_{\max} = 18 \text{ kg}$$

- **Počáteční vlhkost prádla** – v běžné praxi je prádlo po vyprání odstředěno pračkou. Obvykle jsou pračky schopné při odstředování dosáhnout relativní vlhkosti prádla mezi 80 % až 60 %. Vlhkosti zvolené pro experiment plně odpovídají současným konvekčním průmyslovým přístrojům (pračkám). Horní mez vlhkosti představuje velmi vlhké prádlo, málo odstředěné. Oproti tomu vlhkost prádla mezi 60 a 70 % se dá považovat za vysoce odstředěné a u některých textilií se nedoporučuje používat z důvodu vysokých otáček při odstředování a následného možného poškození vláken či struktury textilie.

$$X_{\min} = 67 \text{ } \%$$

$$X_{\text{central}} = 73,5 \text{ } \%$$

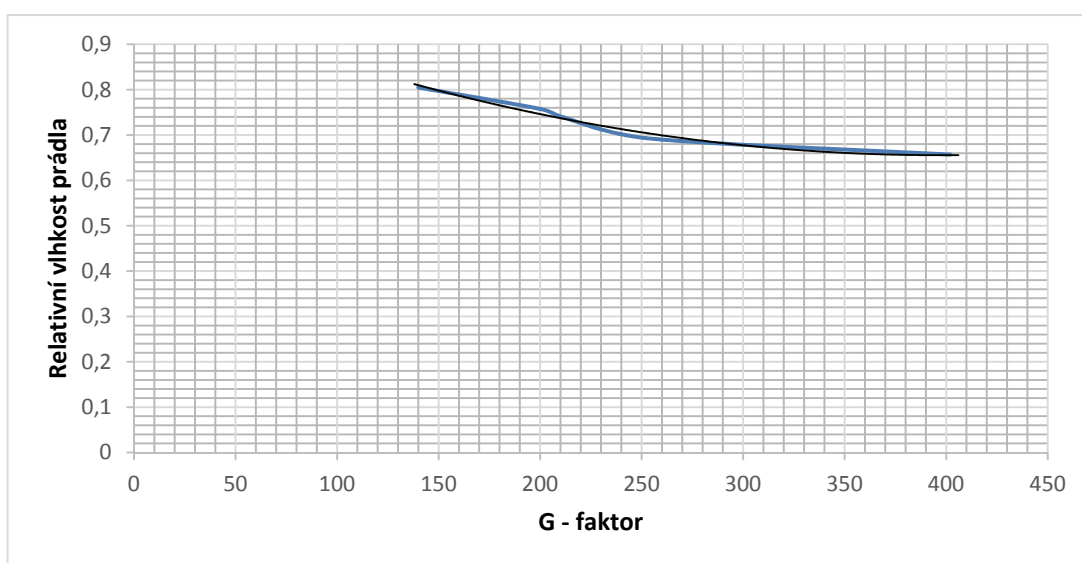
$$X_{\max} = 80 \text{ } \%$$

Výsledná vlhkost prádla se tedy odvíjí od otáček bubny při odstředování. V praxi se obvykle při odstředování na přístroji nenastavuje výsledná vlhkost ale počet otáček, a proto je nezbytné tuto vazbu zjistit. Závislost otáček na vlhkosti byla zjištěna rovněž experimentálně před započítáním samotného experimentu. Prádlo bylo několikrát odstředěno na různý počet

otáček. Následně byl vytvořen graf č. 1 a na základě přepočtu stupně odstředění a získaných dat lze opětovným přepočtem určit vlhkost prádla. Graf znázorňuje tuto závislost, počet otáček RPM se vypočte pomocí vzorce:

$$RPM = \frac{\sqrt{\frac{g \times G_{factor}}{d}}}{\frac{\pi}{30}}; \quad (4.1)$$

kde $g[m.s^{-2}]$ je gravitační zrychlení, $d[m]$ je poloměr bubnu pracího/odstředujícího přístroje a $G_{factor} [-]$ je odečten z grafu. Výpočet stupně odstředění lze najít v příloze *KompaktníBubnovýSušičT-16_MODEL_ZáznamyDat_JanGutovský*.



Graf č.1: Závislost otáček na vlhkosti.

K dosažení požadované hodnoty vlhkosti je tedy potřeba odstředovat nákladku dle výše uvedeného vzorce. Byly vytvořeny 3 odstředovací programy pro pračku. Každý pro jednu hodnotu vlhkosti a výsledky mají podobu:

$$\begin{aligned} X_{\min} &= 67 \% \approx RPM = 980 \text{ ot/min} \\ X_{\text{central}} &= 73,5 \% \approx RPM = 710 \text{ ot/min} \\ X_{\max} &= 80 \% \approx RPM = 580 \text{ ot/min} \end{aligned}$$

Lze vidět, že prostřední hodnota mezi maximální a minimální hodnotou RPM není prostřední hodnota mezi maximální a minimální vlhkostí. Toto je důvod, kvůli kterému je hodnota vlhkosti přepočítávána podle výše uvedeného postupu. Za zmínku stojí i to, že hodnota 980 ot/min je maximální možný výkon pračky při odstředování a tudíž při těchto otáčkách, je možno dosáhnout minimální vlhkosti prádla.

Plán experimentu

Předpoklad jednoho dílčího měření je 1,5 hodiny (příprava nákladky, proces sušení), jedná se tedy o časově velmi náročný experiment. Byla navržena 2 opakování (replikace) v každém

bodě, aby se částečně eliminoval vliv nezjišťovaných faktorů a dále se určit průměrná hodnota. Rozhodnutí o počtu opakování znamená rovnoměrně experiment rozdělit do 4 bloků po 6 měřeních. Rozdělení měření v blocích je náhodné (tzn. randomizace).

Počet replikací: $n = 2$

Počet bloků: $b = 4$

Počet měření v bloku: $a_{\text{blok}} = 6$

Celkový počet měření: $a_{\text{celk}} = 24$

Celkem tedy bude provedeno 24 dílčích měření (tzn. 8 krajních bodů x 2 replikace + 8 měření centrálního bodu). Jednotlivá měření obsahují různé kombinace faktorů (s výjimkou centrálního bodu).

Teoreticky nižší počet replikací může znamenat horší popsání procesu modelem, ale větší počet těchto replikací by byl časově ještě náročnější. Obrázek č. 14 znázorňuje plán experimentu. První sloupec definuje opakování bodu – replikaci. Ve druhém sloupci lze vidět, zda se v daném kroku měření jedná o centrální bod či nikoliv (0 - ano; 1 - ne), rovněž označený jako (C).

Standard pokus	Návrh: 2 ^{**} (3-0) schéma (Tabulka1)					
	Replikace	Centrální bod	Blok	Dosažená hmotnost suché nakládky [kg]	Teplota sušícího média [°C]	Požadova ná vlhkost [%]
9 (C)	1	0	1	16	60,00	73,50
17	2	1	1	18	50,00	67,00
5	1	1	1	18	50,00	67,00
21 (C)	2	0	1	16	60,00	73,50
4	1	1	1	14	70,00	80,00
16	2	1	1	14	70,00	80,00
15	2	1	2	14	70,00	67,00
10 (C)	1	0	2	16	60,00	73,50
22 (C)	2	0	2	16	60,00	73,50
3	1	1	2	14	70,00	67,00
6	1	1	2	18	50,00	80,00
18	2	1	2	18	50,00	80,00
7	1	1	3	18	70,00	67,00
23 (C)	2	0	3	16	60,00	73,50
14	2	1	3	14	50,00	80,00
2	1	1	3	14	50,00	80,00
19	2	1	3	18	70,00	67,00
11 (C)	1	0	3	16	60,00	73,50
12 (C)	1	0	4	16	60,00	73,50
8	1	1	4	18	70,00	80,00
24 (C)	2	0	4	16	60,00	73,50
20	2	1	4	18	70,00	80,00
1	1	1	4	14	50,00	67,00
13	2	1	4	14	50,00	67,00

Obrázek č. 14: Plán experimentu.

Významnou podmínkou a předpokladem jsou stále okolní podmínky v místě měření. Podmínky musí být konstantní z důvodu udržení stejné hygroskopické vlhkosti v prádle (viz kapitola 2.2.3). Při jejich nedodržení dochází ke zkreslení měření a výsledků. Podmínky v laboratoři v průběhu experimentu byly tyto:

Okolní teplota:	23 °C ($\pm 0,8$ °C)
Relativní vlhkost vzduchu:	17,2 % (± 1 %)
Tlak v laboratoři:	992 kPa (± 3 kPa)
Nadmořská výška:	292 m.n.v.

K experimentu bylo použito 105 kusů bílých froté ručníků (tabulky s podrobnější dokumentací lze najít v příloze). Čas byl zaznamenáván běžnými stopkami. Toto pro experiment více než dostačuje, jelikož čas bude měřen v jednotkách minut a tudíž možné odchylky v jednotkách sekund jsou pro vyhodnocení nepodstatné.

Před začátkem experimentu byl každý ručník zvážen a označen číslem. Následně v průběhu experimentu pro každé dílčí měření byla nakládka namíchána z náhodně vybraných jiných ručníků. Úkon zvážení každého kusu textilie není nutný. Slouží jen k informaci o opotřebení prádla během několikanásobného odstředění a vysušení. Nicméně změny v hmotnosti po provedení všech 24 měření jsou okolo 0,5 % z celkové váhy každého ručníku. Pro experiment je však důležitá celková váha nakládky.

Jak již bylo zmíněno, experiment se skládá ze 4 bloků. Jelikož je náročné udržet okolní podmínky konstantní v průběhu 24 hodin (především dne a noci) a v jednom dni se je možno provést pouze omezený počet měření, byly bloky rozloženy na 4 dny. Nicméně mezi jednotlivými měřeními v blocích nejsou odlišnosti a bylo postupováno stále stejně bez rozdílu, zda se jednalo o poslední nebo první měření v bloku.

Nutností bylo taktéž uvážit, jak budou výsledky vyhodnocovány, popř. jakých nástrojů bude k tomu užito. Analýza výsledků probíraného experimentu je provedena s pomocí softwaru *Statistica*. Na trhu ovšem existuje spousta jiných programů, které jsou pro tento účel rovněž dostačující.

4.3.2 Postup při experimentu

Tato podkapitola přesně popisuje provedení jednotlivých kroků a úkonů tak, jak šly po sobě a také komplikace které během jednotlivých měření nastaly. Jsou zde navržena řešení, jak v budoucnu předcházet těmto problémům v případě opakovaného experimentu.

I. – Příprava na měření, kontrola zařízení

Do prvního kroku lze zařadit přípravu na experiment. Je třeba provést zkoušky, několik měření „na nečisto“ před započítáním samotného experimentu. Jde o to si vyzkoušet, jak může experiment probíhat (během této zkoušky je například dobré zjistit vztah mezi vlhkostí prádla a RPM, viz výše).

Znamená to zkontrolovat a otestovat funkce samotného sušiče, spustit jej se zkušební nakládkou (s velkou vlhkostí i hmotností textilie) kvůli zjištění času. Toto následně slouží

jako obrázek o časovém plánu experimentu. Dále otestovat vážící systémy, čidla vlhkosti a tepla a ostatní měřidla. Je třeba připravit plán experimentu, dle kterého se připravují jednotlivé nakládky. Rovněž je potřeba zaznamenat podmínky v laboratoři, tj. zapsat hodnoty tlaku, vlhkosti a teploty vzduchu a zajistit, aby tyto podmínky zůstaly stejné po celou dobu experimentu. Kromě zmíněných kontrol je postup stejný jako v „ostrém“ experimentu, který se bude řídit následujícími kroky:

II. - Příprava nakládky

V prvním kroku bylo nutno nejprve zajistit požadovanou hmotnost a vlhkost textilie (froté ručníky). Toto znamená co nejpřesněji odvážit nakládku suché textilie s použitím nájezdové váhy. Po dosažení stanovené hodnoty se prádlo navlhčí tak, aby mělo hodnotu vlhkosti v souladu s plánem experimentu. Vlhčení nakládky probíhá s použitím pračky, která textilií důkladně promíchá s velkým množstvím vody a následně odstředí. U pracího přístroje se nastavuje počet otáček odstředění. Po vyjmutí z pračky je navlhčené prádlo opět zváženo a data zaznamenána kvůli informaci o obsahu vody v textilií. Z těchto hodnot je určena relativní vlhkost. Relativní vlhkost by se měla co nejvíce přiblížit hodnotě stanovené plánem experimentu.

- **Komplikace** – tento krok byl pro vytvoření modelu nejkritičtější z důvodu špatné dosažitelnosti přesných hodnot vlhkosti i hmotnosti nakládky. V následné analýze dat toto může znamenat znepráchnění modelu. I přes veškerou snahu bylo velmi obtížné dosáhnout přesné hmotnosti pro suchou nakládku. Odlišnost se pohybovala v řádech desetin kilogramu. Tyto rozdíly například dosahovaly ± 250 g (toto znamenalo nepřesnost v rozmezí 2 až 4 %). Další zásadní problém v tomto kroku bylo docílení požadované vlhkosti. S pomocí odstředění v pračce se také nikdy nepodařilo dosáhnout přesné vlhkosti, která byla stanovena plánem experimentu. Průměrná odchylka od hodnoty byla 3 % a v některých případech až 7 %.
- **Návrhy řešení** - jedno z řešení, které by mohlo vést k dosažení cílené a přesné hodnoty ohledně komplikací s navážením nakládky textilie, by bylo zvolit rozměrově menší. Lze také říci lehčí kusy textilie, u kterých by bylo snazší spolehlivě docílit požadované hmotnosti. Nakládka by se tedy skládala z lehčích částí, a tudíž by bylo jednodušší docílit dostatečně přesné hodnoty přidáním, popřípadě odebráním kusů textilie. Toto může mít ovšem také své nevýhody, jelikož v praxi se lze setkat s takovou textilií jen velmi zřídka. Další, pravděpodobně přijatelnější, možností by bylo použít pro jednotlivé nakládky pokaždé stejnou dávku textilie (pro experiment řešený touto prací by šlo o tři: 14 kg, 16 kg, 18 kg). Toto by zajistilo pokaždé identickou nakládku, což by ale mohlo vznést chybu do modelu z důvodu nepoužití náhodného kusů textilie. Je otázkou, která chyba by byla významnější. Problém týkající se dosažení vlhkosti se zdá být složitější. Praxe i přes původní přípravu a testování ukázala, že odstředěním nelze uspokojivě docílit stanovené výsledné hodnoty. Jednou z cest je odstřeďovat textilií tak dlouho, než bude výsledek přijatelný (tzn. opakovat odstřeďování do té doby než, se bude vlhkost shodovat s plánem). Toto

však v praxi může trvat nekonečně dlouho. Rovněž jako řešení se jeví vytvoření přesnějšího modelu pro odstředování v pračce (vytvořit model z většího počtu opakování k dosažení). Na druhou stranu praxe ukázala, že odstředování není jednoduché popsat výše uvedeným způsobem a vlhkosti po odstředění jsou rozdílné i při použití stejných otáček. Řešením také může být smíchání suché nakládky s předem odměřeným objemem vody tak, aby poměr hmotnosti vody a textilie ve výsledku dal správnou vlhkost. Problém u toho řešení je, že po provedení tohoto úkonu, jednotlivé kusy prádla nemusí mít stejnou vlhkost. Prádlo by se dostalo až po nějaké době do rovnovážného stavu, ale toto by bylo opět nepohodlné z důvodu čekání než se tak stane. Z časového hlediska bylo v experimentu zvolené řešení, i přes relativně velkou nepřesnost, hodnoceno jako nejprůmyslnější.

III. – Sušení

Po kompletní přípravě nakládky a zjištění parametrů je nakládku možné umístit do sušiče a přejít k samotnému procesu sušení. Nicméně ještě před vložením nakládky je vynulována tenzometrická sestava umístěná na sušiči. Poté už lze nakládku vložit do bubny a nastavit teplotu sušicího média, opět dle plánu. Dále je nastavena funkce chlazení na 5 minut (cooling) a proces sušení je ukončen, když čidlo vlhkosti v sušiči zaznamená hodnotu relativní vlhkosti prádla 5 %. Po této události se spustí funkce chlazení. Konečná hodnota vlhkosti a také chlazení je pro všechny dílčí měření stejná a zahrnuje se celkového času procesu. Chlazení je úmyslně zahrnuto do modelu sušení, protože se jedná o běžnou součást v sušení.

- **Komplikace a řešení** – v tomto kroku zpravidla nedochází k žádné komplikaci, jelikož skoro vše obstarává přístroj. Pokud ale nastane chyba v procesu a sušič předčasně ukončí sušení, většinou se tento problém řeší odstraněním důvodu zastavení, opakuje se dílčí měření (vrácení ke kroku II). Komplikací se jeví také nedostupnost přesné informace o vlhkosti prádla. Vlhkost je zjišťována pouze na odtahu, což může být zavádějící a nepřesné. Přesto je to jediná možnost, jak údaje o vlhkosti měřit. Tuto chybu nelze ovlivnit, bez možnosti přerušení procesu sušení.

IV. – Zjištění parametrů nakládky po sušení

Po ukončení procesu (po skončení sušení i zchlazení nakládky) je opsána hmotnost z tenzometrického snímače. Následně lze prádlo vyjmout a znovu jej zvážit na nájezdové váze, zaznamenat a spočítat relativní vlhkost prádla. Opět je opsán údaj z tenzometrické soustavy po vyjmutí prádla z důvodu zjištění odchylky měření před a po sušení. Poté je vyčištěn filtr sušiče od prachu.

Následuje krok II. s další nakládkou a měření se opakuje.

- **Komplikace a řešení** – když sušič zaznamená hodnotu 5 %, proces se zastaví a začne chlazení, avšak následné měření ukázalo, že prádlo je často více přesušené v rámci okolních podmínek v laboratoři. To znamená, že relativní vlhkost prádla se většinou pohybovala okolo 0 % a ne 5 % jak uváděl sušič. Na toto má zásadní vliv opět hygroskopická vlhkost obsažená v prádle, která je

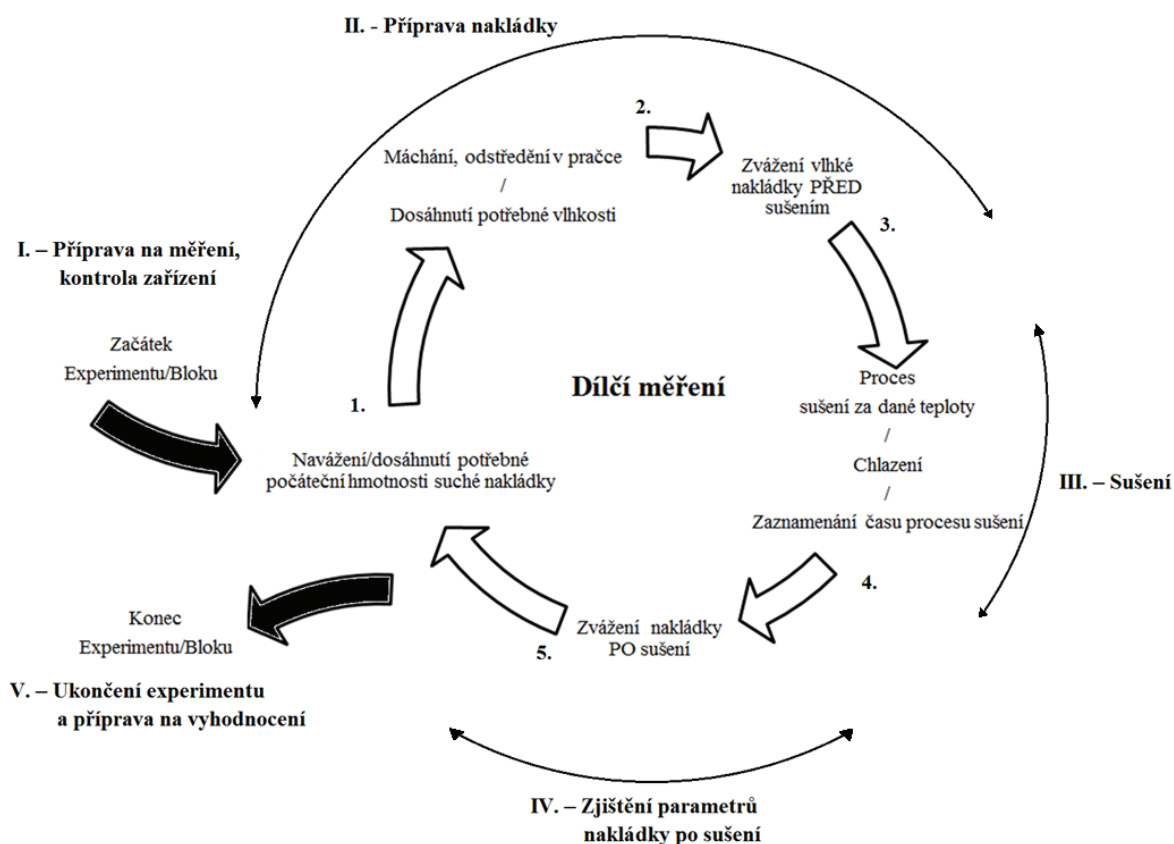
závislá na okolních podmínkách. Z výsledků následně bylo možno určit, že odhad sušiče byl rozdílný hlavně mezi nákladkami s vyšší hmotností a nákladkami s nižší hmotností. Při nižší hmotnosti měl tendenci prádlo přesušovat. Toto nešlo z hlediska provádějícího experiment nijak ovlivnit. Pokud se dílčí měření opakuje se stejnou nákladkou, je dobré nákladku odložit, počkat dokud prádlo nedosáhne rovnovážného stavu s okolními podmínkami v laboratoři. To však vyžaduje čas a to znamená značné prodloužení experimentu. Také je těžké určit, po jaké době tento stav nastane. Řešení je uvažovat původní hodnotu suchého prádla i po přesušení, to ovšem není zcela precizní.

V. – Ukončení experimentu a příprava na vyhodnocení

Po provedení všech dílčích měření experimentu, zaznamenání všech hodnot a sběru dat se může experiment považovat za ukončený a je možno přistoupit k samotnému zhodnocení výsledků.

V následujícím obrázku č. 15 lze vidět základní operace v průběhu experimentu. Schéma zdůrazňuje důležité úkony během jednoho měření.

Prezentace výsledných hodnot z měření popisuje obrázek č. 16 s tabulkou. Tabulka v podstatě shrnuje celý experiment. Data jsou vložena do statistického programu a připravená k analýze a vyhodnocení experimentu, kterou se zabývá následující kapitola.



Obrázek č. 15: Schéma základních operací.

Standard pokus	Návrh: 2**(3-0) schéma (Tabulka1)									
	Replikace	Centrální bod	Blok	Dosažená hmotnost suché nakládky [kg]	Hmotnost před sušením [kg]	Teplota sušícího média [°C]	Požadova ná vlhkost [%]	Dosažená vlhkost [%]	Program odstředění	Celkový čas [min]
9 (C)	1	0	1	16,30	27,5	60,00	73,50	68,712	24	55,00
17	2	1	1	17,80	29	50,00	67,00	62,921	22	77,00
5	1	1	1	17,80	29	50,00	67,00	62,921	22	69,00
21 (C)	2	0	1	16,10	27,3	60,00	73,50	69,565	24	60,00
4	1	1	1	14,30	26	70,00	80,00	81,818	20	58,00
16	2	1	1	13,80	25,9	70,00	80,00	87,681	20	56,00
15	2	1	2	13,90	22,9	70,00	67,00	64,748	22	43,00
10 (C)	1	0	2	16,00	26,9	60,00	73,50	68,125	24	55,00
22 (C)	2	0	2	16,10	26,8	60,00	73,50	66,460	24	55,00
3	1	1	2	13,90	22,9	70,00	67,00	64,748	22	43,00
6	1	1	2	17,90	31,7	50,00	80,00	77,095	20	77,00
18	2	1	2	18,20	31,8	50,00	80,00	74,725	20	77,00
7	1	1	3	17,83	28,58	70,00	67,00	60,292	22	51,00
23 (C)	2	0	3	16,10	28,09	60,00	73,50	74,472	24	54,00
14	2	1	3	14,10	25	50,00	80,00	77,305	20	59,00
2	1	1	3	14,10	25,32	50,00	80,00	79,574	20	59,00
19	2	1	3	17,90	28,99	70,00	67,00	61,955	22	52,00
11 (C)	1	0	3	16,20	27,27	60,00	73,50	68,333	24	54,00
12 (C)	1	0	4	16,07	27,33	60,00	73,50	70,068	24	55,00
8	1	1	4	17,81	32,39	70,00	80,00	81,864	20	62,00
24 (C)	2	0	4	16,07	27,28	60,00	73,50	69,757	24	51,00
20	2	1	4	17,81	32,24	70,00	80,00	81,022	20	63,00
1	1	1	4	13,83	22,27	50,00	67,00	61,027	22	49,00
13	2	1	4	13,82	22,35	50,00	67,00	61,722	22	47,00

Obrázek č. 16: Zaznamenané výsledné hodnoty.

4.4 Analýza výsledků

Je třeba brát v úvahu, že pokud ten samý experiment a se stejnými úrovněmi faktorů provedeme znovu, je velice nepravděpodobné, že z experimentu vyjdou stejné výsledky. Mohou za to různé šумы a neodstranitelné vlivy [25].

Při prvním pohledu na údaje získané ze zkoušky provedené podle zmíněného postupu lze pozorovat, jak již bylo také uvedeno v problémech experimentu, že počáteční hodnoty vlhkosti a hmotnosti se požadovaných hodnot značně liší.

Dále si můžeme všimnout, že rozdíly v celkovém čase sušení jsou významné - hodnoty se pohybují v rozmezí od 43 do 77 minut. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou je značný - 34 minut. Lze pozorovat, že replikace se stejnými počátečními podmínkami faktorů se rovněž výrazně liší (vždy 2 opakování, tedy 2 měření). Rozdíl někdy dosahoval až 6 minut (cca 10 %), což se nepříznivě projeví na přesnosti modelu. Toto však jen dokazuje, jak složitý proces sušení prádla je, a jak obtížné je předpovídat celkový čas vysušení prádla s přesností i na celé minuty.

4.4.1 Rozbor v programu *Statistica*

Obrázek č. 17 v podstatě shrnuje celý experiment, obsahuje výpis nastavení faktorů, statistiky jako jsou průměry (*Means*), počet pozorování (*N*) v jednotlivých dílčích měřeních

plánu a toto ukazuje, že pouze ve dvou případech bylo dosaženo shodných počátečních podmínek.

Design: 3 factors at two levels (Návrh: 2 ^{**} (3-0) schéma (Tabulka						
	(Block)	Dosažená hmotnost suché nakládky [kg] (Cont.)	Teplota sušícího média [°C] (Cont.)	Dosažená vlhkost [%] (Cont.)	Celkový čas [min] Means	Celkový čas [min] N
1	1	13,80000	70,00000	87,68116	56,00000	1
2	1	14,30000	70,00000	81,81818	58,00000	1
3	1	16,10000	60,00000	69,56522	60,00000	1
4	1	16,30000	60,00000	68,71166	55,00000	1
5	1	17,80000	50,00000	62,92135	73,00000	2
6	2	13,90000	70,00000	64,74820	43,00000	2
7	2	16,00000	60,00000	68,12500	55,00000	1
8	2	16,10000	60,00000	66,45963	55,00000	1
9	2	17,90000	50,00000	77,09497	77,00000	1
10	2	18,20000	50,00000	74,72527	77,00000	1
11	3	14,10000	50,00000	77,30496	59,00000	1
12	3	14,10000	50,00000	79,57447	59,00000	1
13	3	16,10000	60,00000	74,47205	54,00000	1
14	3	16,20000	60,00000	68,33333	54,00000	1
15	3	17,83000	70,00000	60,29164	51,00000	1
16	3	17,90000	70,00000	61,95531	52,00000	1
17	4	13,82000	50,00000	61,72214	47,00000	1
18	4	13,83000	50,00000	61,02675	49,00000	1
19	4	16,07000	60,00000	69,75731	51,00000	1
20	4	16,07000	60,00000	70,06845	55,00000	1
21	4	17,81000	70,00000	81,02190	63,00000	1
22	4	17,81000	70,00000	81,86412	62,00000	1
All Runs					57,54167	24

Obrázek č. 17: Schéma návrhu a pozorované rozdíly mezi realitou a modelem.

Pokud je řádek zvýrazněn červeným písmem, znamená to, že je daný faktor na řádku významný – důležitý pro model, obrázku č. 18 můžeme toto pozorovat. Naopak takto neoznačený řádek říká, že daný faktor nemá podstatný vliv na model.

Při analýze výsledků se obvykle volí použití nejjednodušší modelu, který však musí poskytovat odpovídající vysvětlení sledované proměnné, tedy času. Složitost modelu, který se dá analyzovat, je omezen počtem provedených pokusů (čím více je pokusů provedeno, tím více složitější model může být) [25]. Složitost modelu je nastavena na třírozměrnou interakci mezi všemi faktory. Protože plán obsahuje taktéž centrální body, je v modelu zahrnut i efekt zakřivení - křivost (*Curvatr.*). Křivost je zvýrazněna červeně a to znamená, že tento je efekt statisticky významný a tedy lineární model (naš případ modelu) nestačí k popisu závislosti mezi faktory a sledovanou veličinou. Toto také znamená, že program přesně nedokáže určit kvadráty jednotlivých faktorů. Lze vidět, že efekty bloku nemají statisticky významný vliv na model a z hlediska očekávané přesnosti jsou irrelevantní.

Effect Estimates; Var.: Celkový čas [min]; R-sqr=.96694; Adj.:.93663 3 factors at two levels; MS Residual=5,79666 DV: Celkový čas [min]										
Factor	Effect	Std. Err.	t(12)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	60,3962	0,689208	87,63128	0,000000	58,8945	61,89782	60,39617	0,689208	58,89451	61,89782
(1)Dosažená hmotnost suché nakládky [kg]	16,7244	1,604109	10,42598	0,000000	13,2294	20,21946	8,36221	0,802055	6,61468	10,10973
(3)Dosažená vlhkost [%]	13,6963	2,001475	6,84309	0,000018	9,3354	18,05711	6,84814	1,000738	4,66772	9,02856
(2)Teplota sušícího média [°C]	-12,0678	1,436089	-8,40322	0,000002	-15,1967	-8,93881	-6,03389	0,718045	-7,59837	-4,46940
Curvatr.	-7,4146	2,125930	-3,48772	0,004482	-12,0466	-2,78264	-3,70732	1,062965	-6,02332	-1,39132
Blok(3)	-4,2147	2,931693	-1,43762	0,176103	-10,6023	2,17294	-2,10734	1,465846	-5,30114	1,08647
Blok(2)	-3,8487	2,956829	-1,30164	0,217475	-10,2911	2,59366	-1,92436	1,478415	-5,14555	1,29683
Blok(1)	2,4259	2,869363	0,84546	0,414393	-3,8259	8,67774	1,21297	1,434681	-1,91293	4,33887
1 by 2	-1,8347	2,480011	-0,73978	0,473657	-7,2381	3,56881	-0,91733	1,240005	-3,61907	1,78440
1*2*3	1,6370	2,243873	0,72956	0,479659	-3,2519	6,52602	0,81852	1,121937	-1,62597	3,26301
2 by 3	1,6324	3,297488	0,49503	0,629516	-5,5522	8,81698	0,81618	1,648744	-2,77612	4,40849
1 by 3	-1,5996	3,608989	-0,44322	0,665492	-9,4629	6,26374	-0,79979	1,804494	-4,73144	3,13187

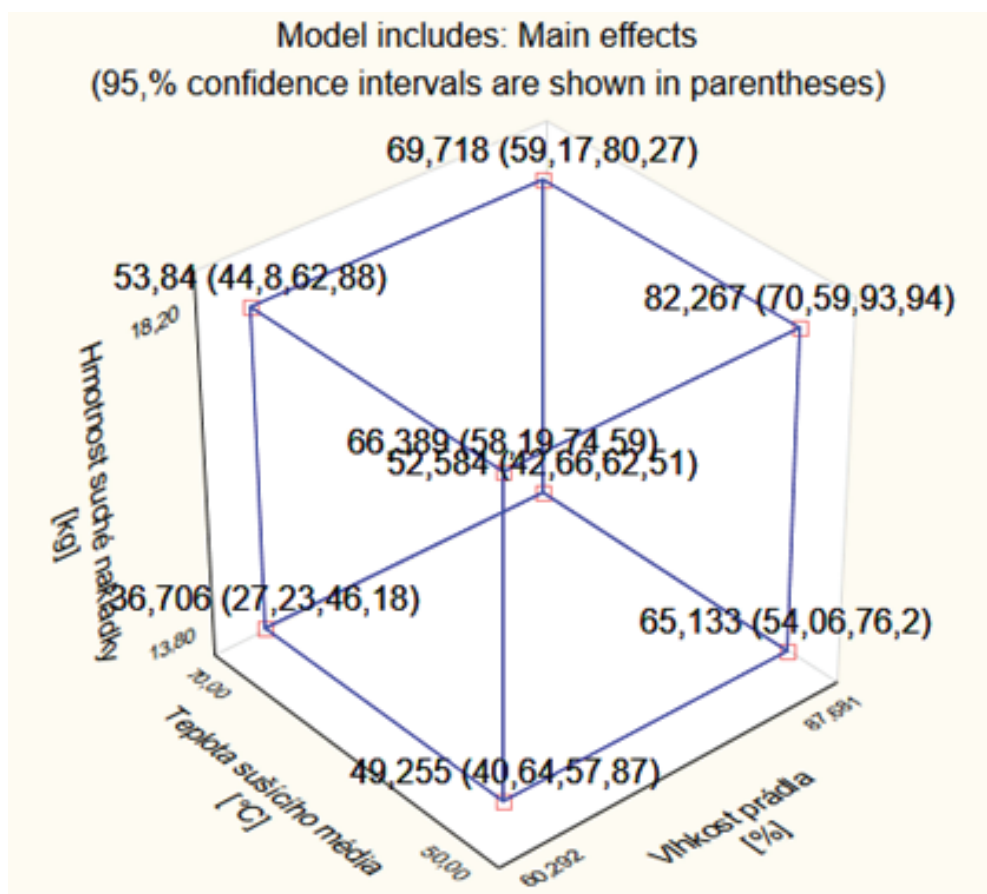
Obrázek č. 18: Odhady efektů.

Následující obrázek č. 19 shrnuje schopnost odhadnout čas a aplikuje jej na jednotlivé měření. Ukazuje, jak moc je model přesný. V prvním sloupci (*Observed*) jsou reálné hodnoty času zaznamenané během experimentu, druhý sloupec (*Predict*) predikuje výsledný čas na základě vypočítaného modelu. Třetí sloupec (*Resids*) ukazuje rozdíl mezi odhadovaným a reálným časem (tzv. rezidua). Na první pohled si nelze nevšimnout, že první měření bylo odhadnuto velmi špatně a to s reziduální chybou 6,76 minuty. Průměr absolutních reziduí, pokud se berou v úvahu všechna měření, je přibližně 2 minuty, což se dá považovat za přijatelný výsledek.

Observed, Predicted, and Residual Values (Návrh: 2**(3-0) schéma (Tabulka1) in gutovsky02_1) 3 factors at two levels; MS Residual=5,79666 DV: Celkový čas [min]			
Case or Run	Observed	Predictd	Resids
9 (C)	55,00000	61,75954	-6,75954
17	77,00000	73,03727	3,96273
5	69,00000	73,03727	-4,03727
21 (C)	60,00000	61,39589	-1,39589
4	58,00000	55,80295	2,19705
16	56,00000	57,38172	-1,38172
15	43,00000	43,31065	-0,31065
10 (C)	55,00000	58,67811	-3,67811
22 (C)	55,00000	58,24542	-3,24542
3	43,00000	43,31065	-0,31065
6	77,00000	76,70912	0,29088
18	77,00000	77,16070	-0,16070
7	51,00000	50,95080	0,04920
23 (C)	54,00000	59,09347	-5,09347
14	59,00000	58,29192	0,70808
2	59,00000	59,52315	-0,52315
19	52,00000	52,12013	-0,12013
11 (C)	54,00000	56,43518	-2,43518
12 (C)	55,00000	56,60299	-1,60299
8	62,00000	62,79770	-0,79770
24 (C)	51,00000	56,44798	-5,44798
20	63,00000	62,32540	0,67460
1	49,00000	47,95100	1,04900
13	47,00000	44,58225	2,41775

Obrázek č. 19: Schéma návrhu a pozorované rozdíly mezi realitou a modelem.

Při experimentu bylo komplikované dosáhnout plánem požadovaných hodnot. Dosažené počáteční hodnoty vlhkosti a hmotnosti nejsou přesné, a pokud si představíme prostor, který se snažíme daty získaných z experimentu popsat, tedy krychli, jsou tyto hodnoty špatně umístěné - mimo polohu (viz obrázek č. 20 *Statisticou*). Při vyhodnocování má program *Statistica* s tímto problémy. Nejmarkantnější rozdíly jsou v dosažených hodnotách centrálních bodů (střed krychle). Obecně se dá říci, že pomocí opakovaného měření centrálního bodu se ověřuje, jak moc přesný model je. Někdy se toto může řešit tak, že se měření na centrálních bodech neprovede, ale experiment se realizuje dvakrát. Když tedy centrální hodnotu změníme, což je v našem případě nepřesnost v dosahování hodnot vlhkosti a hmotnosti, program nedokáže přesně vyhodnotit/vypočítat chtěný model. Střední body software používá ke zjištění křivosti, což znamená ověřit, zda je vztah mezi jednotlivými faktory a sledovanou veličinou (čas) lineární či nikoliv.

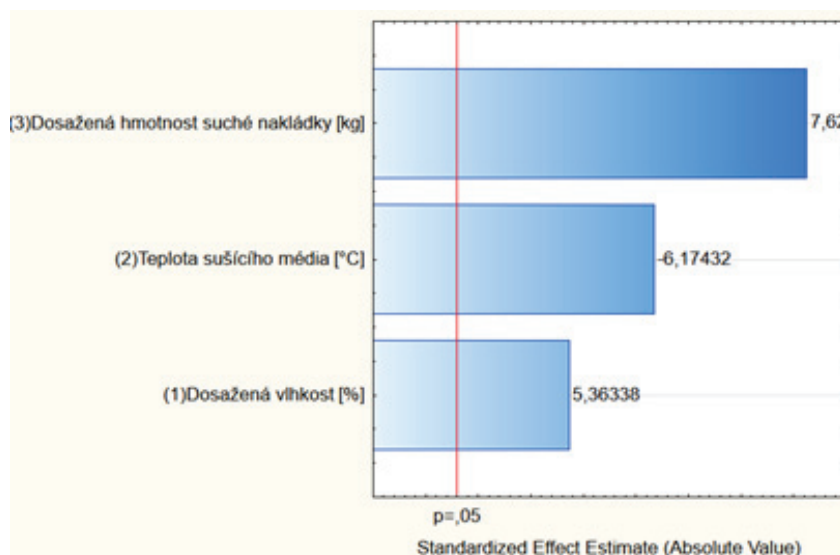


Obrázek č. 20: Modelem popisovaný prostor.

Řešením tohoto nedostatku je naměřit axiální body, tj. zjistit informace o hodnotách ve vybraných bodech, například ve středech stěn krychle. Toto však znamená přikročit k dalším měření na sušiči, což nebylo možné. Nejjednodušší alternativou bylo do výsledné analýzy centrální body vůbec nezahrnovat a brát v potaz jen krajní body. Toto sice model značně zjednoduší, ale bude poskytovat relevantní výstupy v okolí vrcholů krychle, kde lze očekávat optimum. Následující vyhodnocení je tedy řešeno bez zakřivení a také bez vzájemných interakcí, které byly statisticky nevýznamné, jak bylo uvedeno výše.

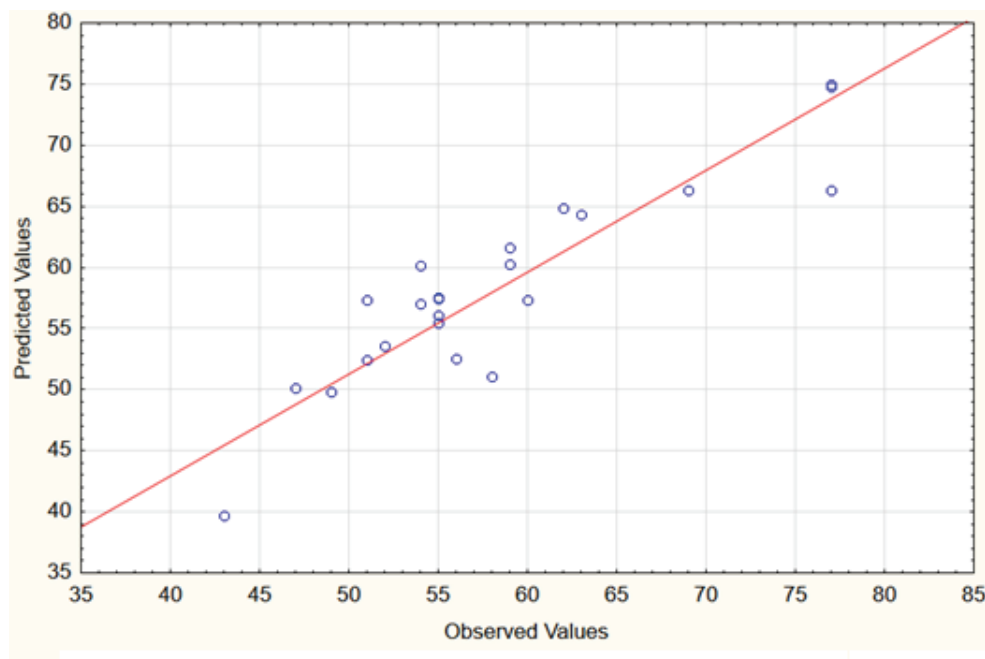
4.4.2 Model – rovnice sušení

Pomocí Paretova diagramu, který je znázorněn na obrázku č. 21 zjistíme, které závislé proměnné jsou významné a nevýznamné. Svislá přímka červené barvy rozděluje diagram, je to kritická hodnota významnosti pro riziko $\alpha = 0,05$. Všechny tři proměnné jsou statisticky významné faktory. Ostatní faktory byly vyhodnoceny jako statisticky nevýznamné. Lze konstatovat, že nejvýznamnější faktor je množství prádla v nakládce oproti nejméně významnému a to vlhkosti.



Obrázek č. 21: Pareto diagram.

Graf č. 2 ukazuje graf, kde lze opět vidět, jak je model přesný. Červená přímka charakterizuje model a jeho odhad hodnoty. Modré body jsou reálné naměřené hodnoty během experimentu.



Graf č. 2: Reálné a predikované hodnoty.

Výstupem experimentu je tedy rovnice (roviny), díky které je možné odhadnout čas sušení prádla včetně 5 minutového zchlazení. Tento matematický vztah popisuje proces sušení na kompaktním bubnovém sušiči *Primus T-16*, při použití froté prádla. Rovnice má tvar:

$$\tau = -8,06361 + 0,57971 \times X - 0,62744 \times T + 3,89409 \times m \quad (4.2)$$

kde X [%] je relativní vlhkost prádla v procentech, T [°C] je teplota sušícího média a m [kg] je hmotnost suchého prádla v kilogramech, potom lze vypočítat čas v minutách.

K této části patří i příloha *KompaktníBubnovýSušičT-16_MODEL_ZáznamyDat_JanGutovský.xlsx*, záložka *Model sušiče T-16, froté*, která obsahuje výpočet času i ostatních veličin na základě uvedené rovnice (viz obrázek č. 21). Pokud jsou známy 3 několikrát zmíněné závislé proměnné, tak se souborem pracuje následujícím způsobem:

1. Určit, které tři závislé proměnné jsou známy.
2. Vybrat na základě známých možností jednu ze čtyř možností.
3. Vyplnit do políček známé proměnné.
4. Tučně označené poslední políčko ukáže správnou hodnotu.

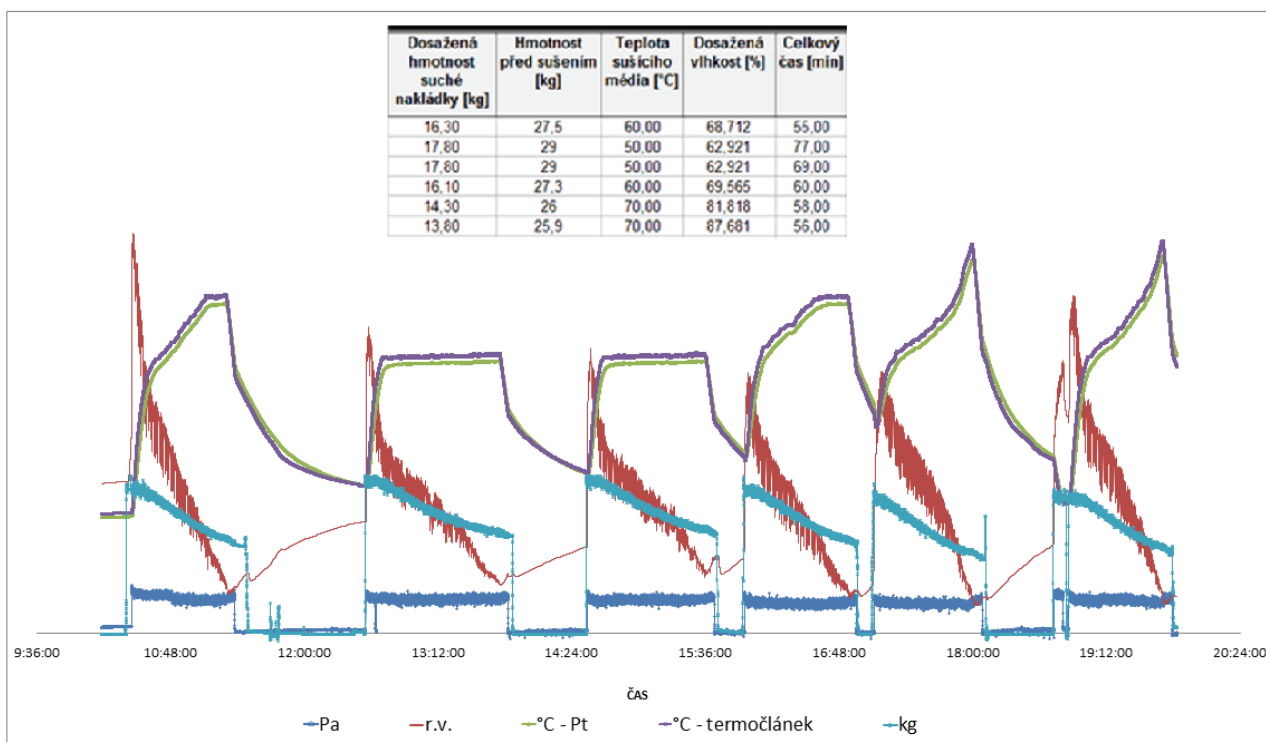
I. možnost	Známé	Relativní vlhkost prádla	Zadejte v rozsahu 67 až 80 %.	70	%	rozsah vyhovuje
		Teplota sušícího média	Zadejte v rozsahu 50 °C až 80 °C.	60	°C	rozsah vyhovuje
		Hmotnost suché nakládky	Zadejte v rozsahu 14 až 18 kg.	15	kg	rozsah vyhovuje
	Neznámá	Celkový čas + 5 min cooling		53	min	
II. možnost	Známé	Celkový čas + 5 min cooling	Zadejte v rozsahu 50 až 80 min.		min	zadejte správný rozsah hodnoty
		Teplota sušícího média	Zadejte v rozsahu 50 °C až 80 °C.		°C	zadejte správný rozsah hodnoty
		Hmotnost suché nakládky	Zadejte v rozsahu 14 až 18 kg.		kg	zadejte správný rozsah hodnoty
	Neznámá	Relativní vlhkost prádla		nedefinováno	%	
III. možnost	Známé	Relativní vlhkost prádla	Zadejte v rozsahu 67 až 80 %.	70	%	rozsah vyhovuje
		Celkový čas + 5 min cooling	Zadejte v rozsahu 50 až 80 min.	53	min	rozsah vyhovuje
		Hmotnost suché nakládky	Zadejte v rozsahu 14 až 18 kg.	15	kg	rozsah vyhovuje
	Neznámá	Teplota sušícího média		60	°C	
IV. možnost	Známé	Relativní vlhkost prádla	Zadejte v rozsahu 67 až 80 %.		%	zadejte správný rozsah hodnoty
		Teplota sušícího média	Zadejte v rozsahu 50 až 80 °C.		°C	zadejte správný rozsah hodnoty
		Celkový čas + 5 min cooling	Zadejte v rozsahu 14 až 18 kg.		min	zadejte správný rozsah hodnoty
	Neznámá	Hmotnost suché nakládky		nedefinováno	kg	

Obrázek č. 21: Vizualizace výpočtového modelu v MS Excel.

4.5 Analýza naměřených dat

Tato podkapitola popisuje a porovnává s původními předpoklady (teorií) průběhy jednotlivých veličin naměřených během experimentu. Podkapitola sama o sobě nepodává žádné nové řešení problému, nýbrž jen prezentuje některé měření a komentuje je. Získaná data potvrdily předpoklady výše uvedené v teorii. Měřidla fungovala správně a na žádném z nich nebyla detekována chyba v měření či nevěrohodnost v poskytovaná data. Všechny naměřené data jsou rovněž v příloze *KompaktníBubnovýSušičT-16_MODEL_ZáznamyDat_JanGutovský.xls*. (Jedná se o velký soubor dat, jelikož data byly zaznamenávány každou sekundu od začátku experimentu, což během 10 hodin hrubého času tvoří přibližně 34 000 hodnot pro jeden blok.)

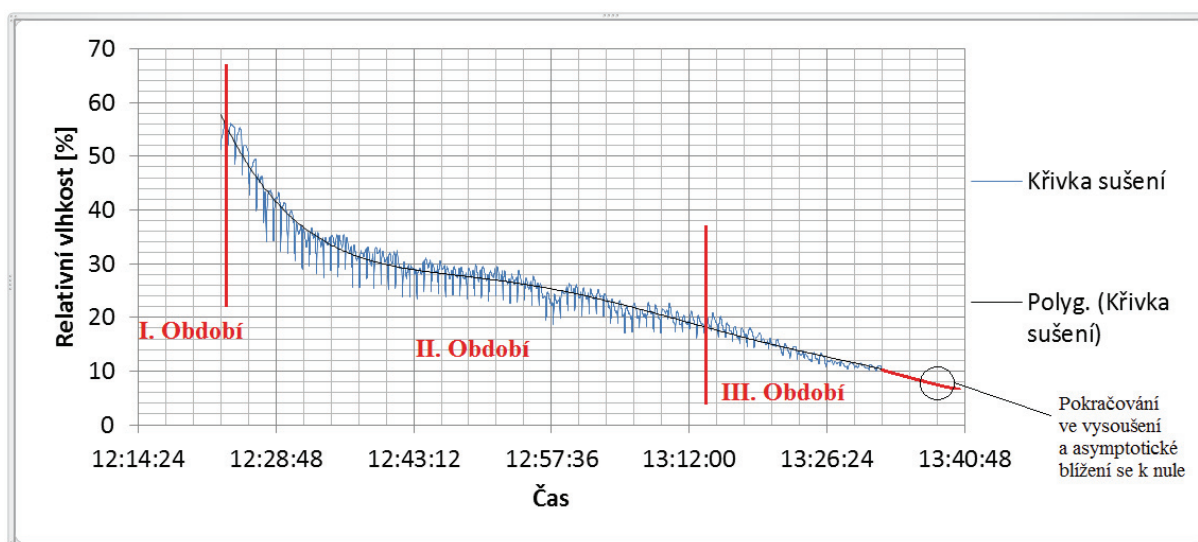
Obrázek č. 22 znázorňuje záznam dat během prvního bloku měření. Obsahuje také samotný plán pro lepší porovnání. V grafu lze vidět a tedy dobře oddělit jednotlivý měření mezi sebou. Nejvýznamnější data z hlediska experimentu se týkají teploty, vlhkosti a hmotnosti. Všechny následující hodnoty pocházejí z měřicí instrumentace uvedené v kapitole 3.2. Z grafu je patrný na první pohled rozdíl v teplotách, lze rozpoznat extrémy a minima, růsty a dá pomocí pouhého oka říci, které měření bylo sušeno za jaké teploty.



Obrázek č. 22: Zaznamenané data během I. bloku.

Sušící křivka

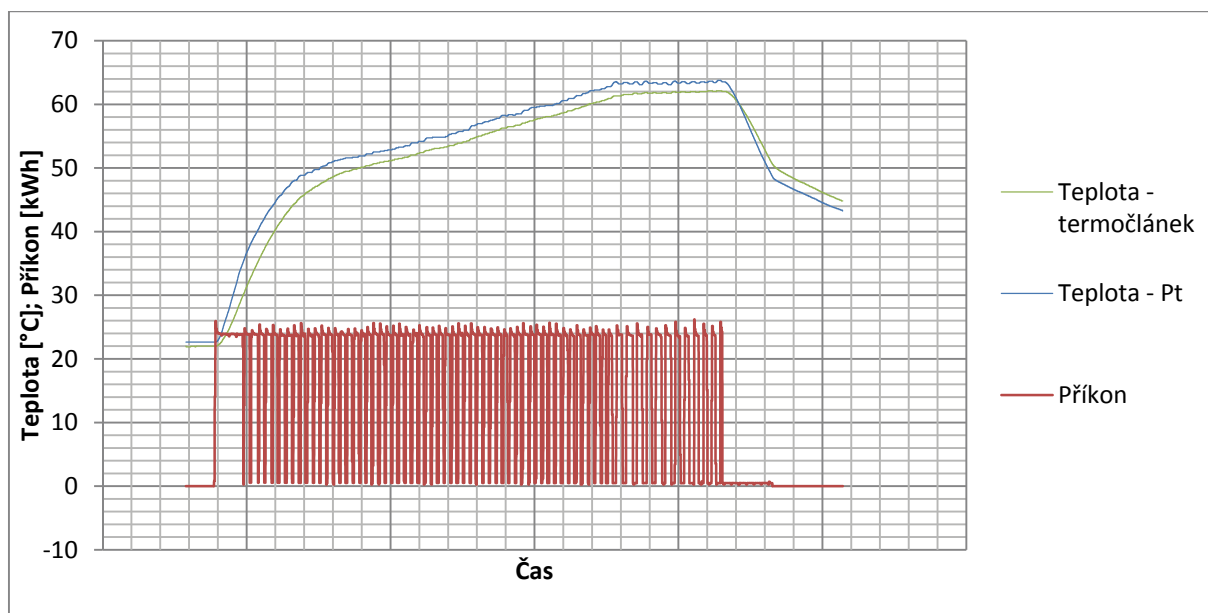
Následující graf č. 3 popisuje křivku sušení během druhého měření v druhém bloku experimentu. Jedná se o nakládku 17,8 kg sušenou horkým vzduchem o teplotě 60 °C. Tato křivka demonstruje jednotlivé fáze během procesu sušení dle kapitoly (2.2.2). Lze zde vidět, že teorie vždy přesně nekoresponduje s reálnou praxí a proto je vyznačení jednotlivých sušících období zveličené. Například první fáze, resp. počáteční období, kdy se teplo dodané horkým vzduchem spotřebovává na ohřev materiálu (prádla) a vysoušení probíhá velmi pozvolna, nelze dobře rozeznat. Fáze druhá - období konstantního sušení, které probíhá nejdéle, je dobře pozorovatelná. Hranici poslední fáze, kdy klesá rychlost vysoušení zde rovněž nelze přesně určit. Je to i dáno tím, že materiál se nesuší do 0 % vlhkosti a nedosáhne rovnovážného stavu.



Graf č. 3: Křivka sušení.

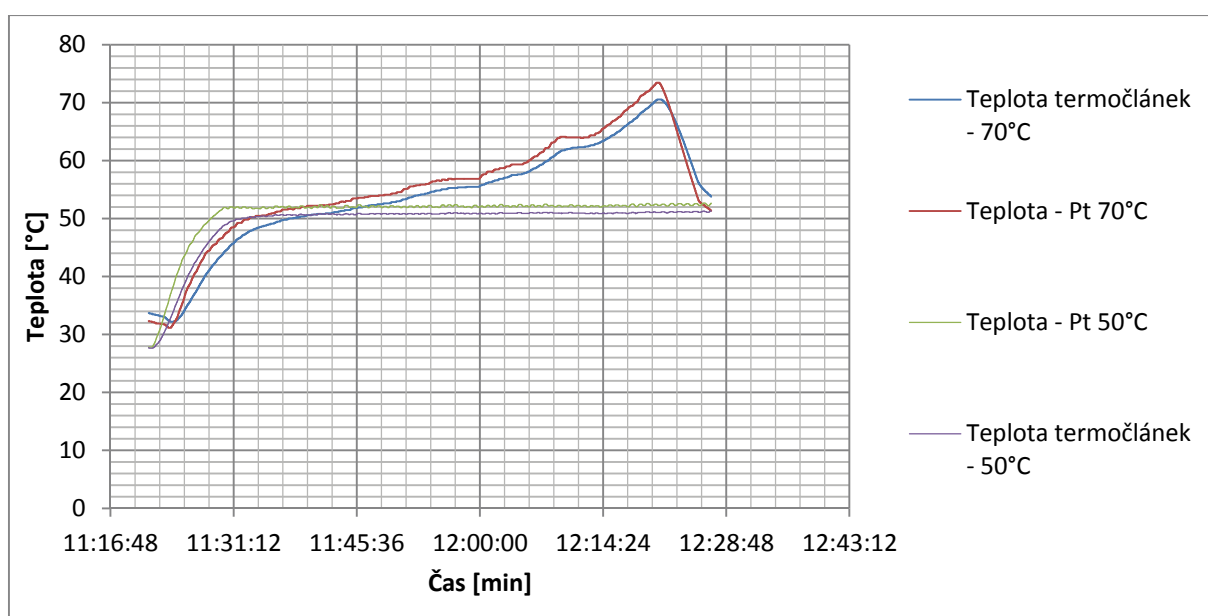
Záznam teploty

Záznam průběhu teploty a dohřívání topnou deskou lze vidět v následujícím grafu. Jedná se o průběh při teplotě sušícího vzduchu 60 °C s 16 kg suchého prádla a vlhkostí 68,8 %. V grafu č. 4 lze vidět střídající se hodnotu příkonu, to je rys, že stroj zapínal topné tělesa, které zahříval vzduch proudící do bubnu. Po dosažení požadované teploty sušícího média, lze vidět, jak sušič dvoustavově řídí ohřev. Toto vytváří pravidelné zvlnění okolo dané hodnoty. Lze rovněž všimnout, že teploměry neudávají stejnou hodnotu a mírně se liší. Rozdíl v hodnotách může být dán v odlišnosti ustalovacích hodnot čidel a jejich odezvě. Dalším důvodem může být umístění čidel v potrubí. Ztráty potrubí teploty v místě, kde je situován termočlánek je výše, tudíž proud má čas mírně ochladnout. Také proud vzduchu u níže umístěného Pt teploměru nemusí být ještě dostatečně promíchaný.



Graf č. 4: Průběh teplot v porovnání s příkonem.

Graf č. 5 charakterizuje situaci, která vždy nastala, pokud bylo sušeno prádlo o vyšší hmotnosti (16 kg a více) při vysoké teplotě (70 °C). Je postřehnutelné, že teplota roste po celou dobu procesu sušení a nastavené a požadované teploty dosáhne až těsně před koncem sušení. Topné tělesa nejsou dostatečně výkonné a tak se teplota nezvyšuje dostatečně rychle, aby dosáhla nastavené hodnoty dříve. Toto je rozdílný jev oproti nakládce s nižší teplotou sušení (50°C) a můžeme jej zaznamenat i v grafu č. 4, kde lze rovněž vidět, že teplota dosáhla už v první třetině sušení a přístroj už jen udržuje teplotu vzduchu a dále ji neohřívá. Toto se považuje za nevýhodu u elektrických sušičů a tento jev většinou nelze nijak ovlivnit. Situace je jiná, pokud se jedná sušič s parním nebo plynovým ohřevem. U těchto typů sušičů teplota zpravidla roste výrazně rychleji.



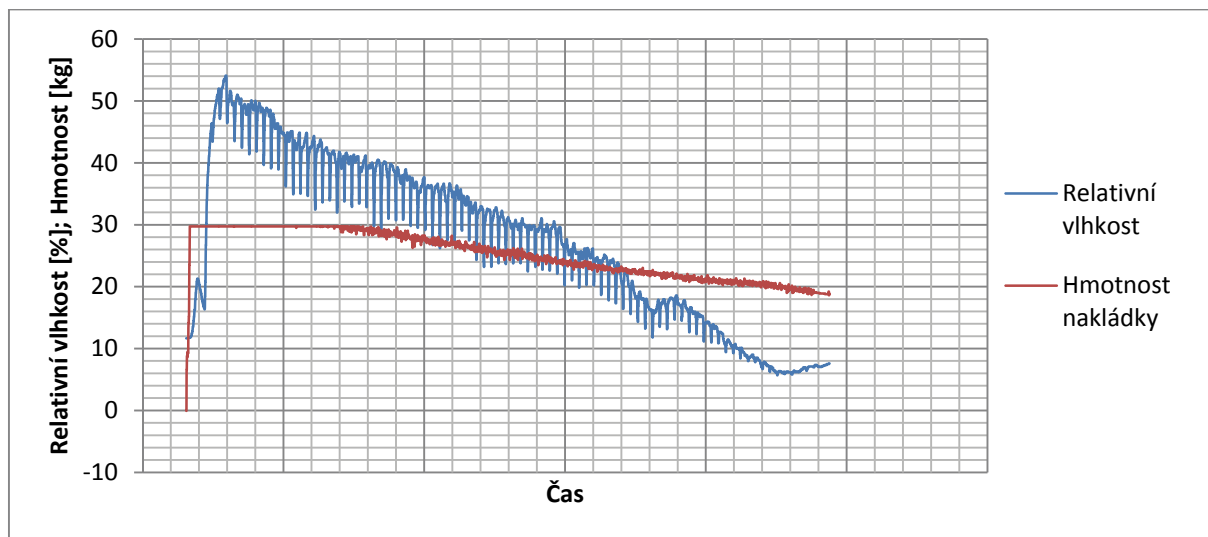
Graf č. 5: Průběh teploty při vyšší hmotnosti nakládky.

Záznam vlhkosti s hmotností

Graf č. 6 kombinuje záznam údajů o hmotnosti ze soustavy tenzometrů a vlhkosti z měřicí sondy vzduchu na odtahu. Toto porovnání je zajímavé, jelikož ukazuje, jak vlhkost sušícího média klesá spolu s hmotností, což je logické, protože se během procesu odpařuje voda. Jedná se o druhé dílčí měření ve čtvrtém bloku se 17,81 kg suchého prádla s relativní vlhkostí 81,86 %. Skrz prádlo proudil vzduch o teplotě 70 °C a proces i se zchlazením trval 62 minut.

Záznam z tenzometrů není plynulý. Pokud se zaměříme na data, lze z nich vyčíst, že tenzometry byly vždy rozladěny po každém cyklu sušení, i když byly vždy před každým měřením vynulovány. Toto je dáno nejspíše vlivem otáčení bubnu. Tenzometry jsou velmi citlivé na pohyb. Důvodem může také být velká citlivost tenzometrů na teplo. Sušič je upevněn na kovových nožkách, kde jsou nalepeny i tenzometry a pokud se aspoň částečné teplo z přístroje převedlo kondukcí na tenzometry, a toto mohlo ovlivnit funkci nebo jejich kombinace.

Křivka relativní vlhkosti taktéž není plynulá a obsahuje hodně zlomů. Opět je to dáno rotací bubnu, kdy je prádlo uvnitř různě převalováno. Vlhkost prádla, skrz kterou horký vzduch proudí, není konstantní, a tudíž není konstantní ani odvod vlhkosti, který se takto projeví v grafu. Po každé rotaci bubnu se prádlo promíchá a následně skrz jinak vlhkou část prádla proudí horký vzduch. Poté nastává další rotace. Lze vidět, že v závěru sušení je rozdíl mezi lokálními minimy a maximy značně menší než na začátku procesu.



Graf č. 6: Průběh vlhkosti v závislosti na úbytku hmotnosti.

Možným námětem pro další práci, popř. tvorbu modelu je dynamické popisování procesu sušení. Pro problém, který se snaží řešit tato práce, však podstatná hodnoty vlhkosti na začátku a konci procesu sušení.

4.6 Shrnutí experimentu

Výstupy z experimentu můžeme považovat jako věrohodné a ukázaly, že předpoklady kladené v návrhu experimentu se potvrdily. Všechny tři faktory měly na závislou sledovanou veličinu, tedy čas, zásadní a podstatný vliv. Nabízí se otázka, který z těchto faktorů je více či méně energeticky náročnější, zda se vyplatí nakládky více odstředovat, resp. začínat sušit prádlo z menší vlhkosti nebo jej sušit pomocí vyšší teploty horkého vzduchu. Popřípadě jak velkou nakládku se suchým prádlem zvolit. Toto by bylo mohlo být námětem pro další měření nebo optimalizaci. Výstupem daného experimentu je model, který je schopen učinit časový odhad, za předpokladu znalosti vlhkosti prádla froté, jeho hmotnosti v suchém stavu a teploty sušicího média, jak dlouho bude proces sušení i s následným zchlazením trvat.

Nevýhoda modelu se jeví jeho úzká zaměřenost. Jak bylo již zmíněno, model se týká jen jednoho sušiče a je určen jen pro jeden typ prádla – froté ručníky. Je třeba si uvědomit, že toto rozhodnutí tak výlučně definovat výstup modelu umožnilo výrazně snížit už tak vysoké číslo dílčích měření v experimentu. Na druhou stranu to znamenalo zpřesnění samotného modelu, při nižším počtu opakování. V praxi tento fakt například může znamenat, že nebude přesně popisovat proces sušení s použitím jiné textilie nebo kombinací textilií (např. ložního prádla). Větší množství výsledků z experimentu na stejné bázi by se daly použít při tvorbě programu v sušiči, který by odhadoval dobu sušení. Program by obsahoval databázi rovnic pro různé typy textilií, teplot, hmotnost suché nakládky. Vlhkost by si přístroj sám změřil. Po zadání a zjištění těchto závislých proměnných, by program v sušiči vybral odpovídající rovnici a predikoval podle ní celkový čas sušení.

5 METODIKA MĚŘENÍ

Pojem metodika označuje pracovní postup (metodu) nebo nauku o metodě. Metodika představuje souhrn doporučených dílčích postupů a úkonů.

V případě této diplomové práce se jedná o metodiku typu empirické metody měření pro vytvoření podobného experimentu, jako byl popsán v předchozích částech. Jedná se o pouze doporučující postupy. Výstupy, které poskytne experiment provedený podle této metodiky, se opět budou týkat pouze jednoho přístroje a jednoho druhu textilu. Nicméně metodiku lze opakovat pro různé druhy sušičů a textilií.

Pořadí	Úkon	Blížší popis		Vybavení	Poznámky	Část
1.	Zjištění základních parametrů sušiče	maximální a minimální kapacita bubnu	seznámit se se základními charakteristikami	manuál k sušiči, popř. informační leták	kapitola 4.3.1	Analýza situace
		maximální a minimální hodnota teploty sušícího média	popř. programem sušiče a jeho prostředním			
2.	Rozvaha o textilií.	určit pro jaký typ textilie bude model určen a jak bude nakládka připravována (zda je k dispozici pračka)		zajištění textilie	počet kusů, kombinace vsádek kapitola 3.1	
3.	Rozvaha v jakém rozmezí by měl model fungovat.	úvaha v jakém rozmezí by měl model proces popisovat	navrhnout krajní body pro teplotu, hmotnost suché nakládky, vlhkost	statistický software	Čím užší intervaly, tím přesnější model), kapitola 4.3.1	
		rozvaha zda zahrnout cooling do modelu				
4.	Plán experimentu	úvaha závislých proměnných	určení faktorů	pokud měním faktory, zajistit měřidla, které budou sledovat faktory	kapitola 4.3.1	Příprava
			úvaha co udělá změna faktorů s modelem			
		plánování experimentu	určení plánu/pořadí, počet měření, počet replikací, bloků	statistický software	popřípadě použít plán z kapitoly 4.3.1	

Pořadí	Úkon	Bližší popis		Vybavení	Poznámky		Část
5.	Zajištění měřicího přístroje.	zaznamenávání času sušení		stopky	Kapitola 3.2	Nezbytná položka!	Příprava
		úvaha, jak se bude vážit, jak se bude pracovat s váhou		váha/nájezdová (jiná)		Nezbytná položka!	
		pro kontrolu na odtahu, zda teplota sušicího média je správná		teploměr			
		kontrola vlhkosti na odtahu, kdy sušič spustí cooling		vlhkoměr			
6.	Úvaha jak dosahovat počátečních podmínek faktorů	vlhkost - vypočítat G-faktor pro pračku, popř. jiný způsob pro zajištění vlhkosti		pokud měním postup nebo zjišťování vlhkosti, zajistit instrumentaci	kapitola 4.3.1		Příprava
7.	Zajistit stále okolní podmínky při experimentu.	měřicí stanice okolních podmínek		vlhkoměr	Analyzovat situaci a předcházet změnám v podmínkách. Kapitola 3.2.3 a 4.3.1		
				barometr			
				teploměr			
9.	Zkušební měření	příprava na měření, zda vše funguje jak má a obecné porovnání čísel s jinými sušiči v (ideální zjistit G-faktor)		Stejně položky jako v kroku č. 5.	doporučeno provést 3x až 4x kapitola 4.3.1 a 4.3.2		Experiment
	Experiment a sběr dat	příprava nakládky - dosažení potřebné počáteční hodnoty vlhkosti, hmotnosti dle plánu	změření a zaznamenání podmínek PŘED		kapitola 4.3.2		
		sušení/chlazení	zaznamenání času				
		zjištění parametrů nakládky po procesu	změření a zaznamenání podmínek PO				
		opakování úkonů	systém pro sběr dat				
10.	Analýza výsledků	vyhodnocení pomocí statistického softwaru		software pro vyhodnocení	kapitola 4.4.1 a 4.4.2		Vyhodnocení
		kontrola průběhů hodnot, zda vše odpovídalo			kapitola 4.5		

Pořadí	Úkon	Bližší popis	Vybavení	Poznámky	Část
11.	Vyhodnocení	Představení výstupů grafů, rovnic a jejich kontrola	Software pro vyhodnocení	<i>kapitola 4.4.1 a 4.4.2</i>	Prezentace a zkouška modelu
		Diskuse výsledků		<i>Zkouška v praxi</i>	
		Ověření, zda model funguje			
Minimální seznam potřeb:		plán experimentu, záznamový list, pračka, stopky, teploměry, vlhkoměr, nájezdová váha (+vozík), barometr, statistický software (<i>Statistica, MS Excel</i>),			

Odhadnout dobu provedení celého experimentu zahrnující všechny kroky je složité. Časově nejnáročnější je rok číslo 9 (Experiment). Doba udávající jak dlouho bude experiment trvat, se především odvíjí od počtu dílčích měření. Na přípravu jedné nákladky můžeme počítat 30 min a samotné sušení 50 až 80 min. Je doporučeno také provést zkušební měření, na které je vhodné si vyhradit přibližně 3-4 hodiny.

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku průmyslového sušení textilu. Jedním z cílů této práce bylo naplánovat a provést experiment na bubnovém kompaktním sušiči. V teoretické části práce byla vysvětlena technologie sušení, její principy a rozdělení vlhkostí. Bylo provedeno bilanční schéma, na jehož základě byly určeny faktory pro experiment. Následně byl popsán konvekční bubnový sušič, na kterém experiment probíhal.

V rámci praktické části této práce byl proveden experiment. Potvrdilo se, že klíčové parametry jako teplota sušícího média, hmotnost a vlhkost nakládky mají zásadní vliv na rychlost procesu sušení. Během experimentu bylo k dispozici 47,5 kg ručníků (105 kusů), toto ve výsledku znamenalo zpracovat 766,62 kg suchého prádla. Čistý čas všech měření během experimentu byl 33 hodin a 26 minut (23 h trvalo samotné sušení a 10 h 26 min zabrala příprava nakládek, tzn. máchání/odstředování). Kompaktní bubnový sušič za 24 měření celkově odpařil 270,8 kg vlhkosti/vody z prádla.

Byl vytvořen model, který adekvátně popisuje proces sušení. Tento výpočtový nástroj, zpracovaný v programu *MS Excel*, je schopen predikovat čas, který sušič potřebuje pro odstranění přebytečné vlhkosti z prádla na základě teploty sušícího média, vlhkosti a hmotnosti nakládky. Byla také navržena a vypracována metodika, díky které je možno provést analogického měření v provozních podmínkách prádelen. Jednoznačnou devízou modelu je následná možnost optimalizovat provoz. To znamená, že prádelna je schopna s touto informací předpokládat a upravovat chod provozu podle potřeby. Toto lze reálně uplatnit a šetřit tak čas, resp. finanční prostředky. Model lze uplatnit i v přípravné fázi realizace prádely ke stanovení sušící kapacity.

Námětem pro další pokračování řešení této problematiky se jeví optimalizovat zároveň s časem spotřebu energií, jelikož se jedná, jak již bylo mnohokrát zmíněno o energeticky vysoce náročný proces s nízkou účinností.

Tématem pro další výzkum, který by vycházel ze znalosti přesného času sušení, je vytvoření programu pro samotný sušič. V prádelenské praxi totiž sušiče časy odhadují, oproti zde vytvořenému modelu, velice nepřesně. Zde přichází v úvahu nevýhoda navrhnutého řešení a tedy, že výpočtový model se týká jednoho typu přístroje a textilie. Nicméně v průmyslovém prádelenství se pere a suší jeden většinou pouze jeden druh textilu dohromady. Tudíž má experiment i v tomto reálné opodstatnění. Experiment měl primárně za úkol navrhnout, jak v takové situaci postupovat a čeho se vyvarovat v reálných provozních podmínkách. Pokud by měl takový program existovat, bylo by potřeba vytvořit databázi modelů, resp. rovnic, které by zahrnovaly všechny možné alternativy a kombinace v sušící proceduře. Na základě této databáze by byl program schopen spolehlivě odhadnout žádanou dobu sušení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] V. Yadav, C.G. Moon, *Fabric-drying process in domestic dryers*, Applied Energy, Volume 85, Issues 2–3, February–March 2008, Pages 143-158, ISSN 0306-2619, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261907000918>
- [2] MUJUMDAR, A. S.: Handbook of industrial drying, CRC/Taylor & Francis, 2007, ISBN 9781574446685.
- [3] HOLEČEK, Oldřich. *14 Sušení*. Návod k laboratornímu cvičení. VŠCHT. [online]. [cit. 2014-04-18]. Praha. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/S.pdf>.
- [4] ŠESTÁK, Jiří, Jaromír BUKOVSKÝ a Milan HOUŠKA. *Tepelné pochody: transportní a termodynamická data*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 245 s. ISBN 80-010-2934-4.
- [5] Sušení. ÚCHI VŠCHT PRAHA. *Encyklopedie chemického inženýrství* [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/echi/su/index.html>.
- [6] T16. In: *Primus laundry* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.primuslaundry.com/cz/tumble-dryers/t-line/t16/>.
- [7] IFF50-250. In: *Primus laundry* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.primuslaundry.com/cz/flatwork-ironers/iff-line/iff50-250/>.
- [8] BOBÁK, P.: *Systém pro hodnocení energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 47 s. Vedoucí diplomové práce. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [9] 25 Sušení. ÚCHI VŠCHT PRAHA. *E-návody a učebnice* [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k25.suseni.pdf>.
- [10] LEE, S. H.; CARR W. W.; BECKHAM, H. W.; LEISEN, J.: A model of through-air drying next term of tufted previous term textile next term materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45:357-366.
- [11] WICHTERLE, Kamil a Marek VEČEŘ. *Základy procesního inženýrství*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2580-9.

- [12] GRDZELIŠVILI, Gulnara. *Sušení rostlinných materiálů*. ČVUT, 2010. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf>. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Hoffman, CSc.
- [13] JÍCHA, Jaroslav. *Sušení*. Brno, 2014, 10 stran. Prezentace z předmětu - Difúzní pochody. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: školní disk R.
- [14] PLUCAR, T. *Návrh experimentální solární sušárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková, Ph.D.
- [15] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. *HW* [online]. 2004 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>.
- [16] Snímače teploty do 400 °C. *Sensit* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/shop/snimace-teploty-do-400-c/28/772b7566.html>.
- [17] Váhy nájezdové. *Copyright 2009-2014 zeman-vahy.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.vahy-pokladny-systemy.cz/85-produkty.html?menu=85>.
- [18] Industrial probe - HC2-ICxxx. *Rotronic* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.rotronic.co.uk/hc2-icxxx.html>.
- [19] Proudění, rychlost a průtok plynů Prandtlovy trubice. *PRUTOKY.CZ. 2014 Schrack Technik spol. s r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlivy-trubice/>.
- [20] T3110 Temperature and humidity outdoor,. *Comet systems* [online]. 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.cometsystem.cz/products/reg-T3110>.
- [21] Typ Na 96. *2014 Schrack Technik spol. s r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.schrack.cz/produkty-eshop/novinky/analyzatory-elektrickych-siti/?L=0>.
- [22] ProfiMessage. In: *Delphin* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.delphin.com/hardware/profimessage.html>.
- [23] ČSN ISO 3534-3. *Statistika - Slovník a značky: Část 3: Navrhování experimentů*. Březen 2001.

- [24] MICHÁLEK, Jiří. *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE)*. Brno, 2010.
Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1012_2.pdf. Učební texty k semináři. Vysoké učení technické v Brně.
- [25] POŠÍK, Petr. *Navrhování a analýza experimentů s programem STATISTICA*. Praha: StatSoft, c2008. ISBN 978-80-903630-8-3.
- [26] MOEN, Ronald D.; NOLAN, Tomas W. ; PROVOST, Lloyd P. . *Improved Quality Trough Planned Experimentation*. United States : McGraw-Hill Companies , 1991. 469 s. ISBN 0-07-042673-2.

PŘÍLOHY

Záznamové listy experimentu

Blok Datum	Označení nakládky	Proces	Čas		Hmotnost suchého [kg]	Teplota [°C]	Otáčky Cooling [ot]/[min]	Hmotnost před procesem [kg]	Hmotnost po procesu [kg]		Relativní vlhkost vypočtená z:		Celkový čas operace
			Start	End					Nájezdová váha	Tenzometry	Nájezdové váhy	Tenzometrů	
1	1E	PRANÍ	8:44	9:10	16,3	20	710	16,3	27,5	-	68,71%	-	0:26:00
	1E	SUŠENÍ	9:16	10:11	16,3	60	5	27,5	16	16,3	0,0184%	0,00%	0:55:00
	2E	PRANÍ	10:50	11:18	17,8	20	980	17,8	29	-	62,92%	-	0:28:00
	2E	SUŠENÍ	11:22	12:39	17,8	50	5	29	17,8	17,7	0,00%	-0,56%	1:17:00
	2E	PRANÍ	12:46	13:14	17,8	20	980	17,8	29	-	62,92%	-	0:28:00
	2E	SUŠENÍ	13:21	14:30	17,8	50	5	29	18,3	19	2,81%	6,74%	1:09:00
3.3.	3E	PRANÍ	14:16	14:42	16,1	20	710	16,1	27,3	-	69,57%	-	0:26:00
	3E	SUŠENÍ	14:46	15:46	16,1	60	5	27,3	16,1	16,4	0,00%	1,86%	1:00:00
	4E	PRANÍ	15:20	15:46	14,3	20	580	14,3	26	-	81,82%	-	0:26:00
	4E	SUŠENÍ	15:56	16:54	14,3		5	26	13,8	14,3	0,035%	0,00%	0:58:00
	4E	PRANÍ	17:02	17:28	13,8	20	580	13,8	26,2	-	89,86%	-	0:26:00
	4E	SUŠENÍ	17:33	17:38	13,8	70	5	26,2	XX	XX	XX	XX	
4E	SUŠENÍ	SUŠENÍ	17:41	18:37	13,8	70	5	25,9	14	15,3	1,45%	XX	0:56:00

Záznamové listy experimentu

Blok	Datum	Označení nakládky	Proces	Čas		Hmotnost suchého [kg]	Teplota [°C]	Otáčky Cooling [ot]/[min]	Hmotnost před procesem [kg]	Hmotnost po procesu [kg]		Relativní vlhkost vypočtená z:		Celkový čas operace
				Start	End					Nájezdová váha	Tenzometry	Nájezdové váhy	Tenzometry	
2	4E		PRANÍ	8:20	8:46	13,9	20	980	13,9	22,9	-	64,75%	-	0:26:00
	4E		SUŠENÍ	8:51	9:34	13,9	70	5	22,9	13,9	14,2	0,00%	2,16%	0:43:00
	3E		PRANÍ	9:20	9:46	16	20	710	16	26,9	-	68,13%	-	0:26:00
	3E		SUŠENÍ	9:50	10:45	16	60	5	26,9	16,1	16,7	0,63%	4,38%	0:55:00
	3E		PRANÍ	10:52	11:18	16	20	710	16,1	26,8	-	67,50%	-	0:26:00
	3E		SUŠENÍ	11:23	12:18	16	60	5	26,8	16	17,1	0,00%	6,88%	0:55:00
7.3.	4E		PRANÍ	12:02	12:28	13,9	20	980	14,2	22,9	-	64,75%	-	0:26:00
	4E		SUŠENÍ	12:34	13:17	13,9	70	5	22,9	13,9	14,7	0,00%	5,76%	0:43:00
	5E2		PRANÍ	12:51	13:17	17,9	20	580	17,9	31,7	-	77,09%	-	0:26:00
	5E2		SUŠENÍ	13:27	14:44	17,9	50	5	31,7	18,3	18,2	2,23%	1,68%	1:17:00
	5E2		PRANÍ	14:52	15:18	17,9	20	580	18,2	31,8	-	77,65%	-	0:26:00
	5E2		SUŠENÍ	15:22	16:39	17,9	50	5	31,8	18,3	19,1	2,23%	6,70%	1:17:00

Záznamové listy experimentu

Blok	Datum	Označení nakládky	Proces	Čas		Hmotnost suchého [kg]	Teplota [°C]	Otáčky Cooling [ot]/[min]	Hmotnost před procesem [kg]	Hmotnost po procesu [kg]		Relativní vlhkost vypočtená z:		Celkový čas operace
				Start	End					Nájezdová váha	Tenzometry	Nájezdové váhy	Tenzometrů	
3	13.3.	5E2	PRANÍ	8:49	9:15	17,8	20	980	17,8	28,58	-	60,56%	-	0:26:00
		5E2	SUŠENÍ	9:27	10:18	17,8	70	5	28,58	17,992	19,4	1,08%	8,99%	0:51:00
		6E3	PRANÍ	10:07	10:34	16,1	20	710	16,1	28,09	-	74,47%	-	0:27:00
		6E3	SUŠENÍ	10:43	11:37	16,1	60	5	28,09	16,49	17,3	2,42%	7,45%	0:54:00
		7E3	PRANÍ	10:58	11:24	14,1	20	580	14,1	25	-	77,30%	-	0:26:00
		7E3	SUŠENÍ	11:41	12:40	14,1	50	5	25	14,14	13,7	0,28%	-2,84%	0:59:00
		7E3	PRANÍ	12:56	13:22	14,1	20	580	14,14	25,32	-	79,57%	-	0:26:00
		7E3	SUŠENÍ	13:29	14:28	14,1	50	5	25,32	14,23	15	0,92%	6,38%	0:59:00
		8E3	PRANÍ	14:02	14:28	17,9	20	980	17,9	28,99	-	61,96%	-	0:26:00
		8E3	SUŠENÍ	14:40	15:32	17,9	70	5	28,99	18,01	19	0,61%	6,15%	0:52:00
		9E3	PRANÍ	15:07	15:35	16,2	20	710	16,2	27,27	-	68,33%	-	0:28:00
		9E3	SUŠENÍ	15:44	16:38	16,2	60	5	27,27	16,12	17,4	0,0049%	7,41%	0:54:00

Záznamové listy experimentu

Blok	Označení nakládky	Proces	Čas		Hmotnost suchého [kg]	Teplota [°C]	Otáčky Cooling [ot]/[min]	Hmotnost před procesem [kg]	Hmotnost po procesu [kg]		Relativní vlhkost vypočtená z:		Celkový čas operace
			Start	End					Nájezdová váha	Tenzometry	Nájezdové váhy	Tenzometry	
4	9E3	PRANÍ	8:32	8:58	16,07	20	710	16,07	27,33	-	70,07%	-	0:26:00
	9E3	SUŠENÍ	9:04	9:59	16,07	60	5	27,33	16,07	16,77	0,00%	4,36%	0:55:00
	8E3	PRANÍ	9:45	10:11	17,81	20	580	17,81	32,39	-	81,86%	-	0:26:00
	8E3	SUŠENÍ	10:23	11:25	17,81	70	5	32,39	18,08	18,98	1,52%	6,57%	1:02:00
	9E3	PRANÍ	10:36	11:02	16,07	20	710	16,07	27,28	-	69,76%	-	0:26:00
	9E3	SUŠENÍ	11:30	12:21	16,07	60	5	27,28	16,25	16,9	1,12%	5,16%	0:51:00
	8E3	PRANÍ	11:50	12:16	17,81	20	580	18,08	32,24	-	81,02%	-	0:26:00
	8E3	SUŠENÍ	12:29	13:32	17,81	70	5	32,24	17,87	18	0,34%	1,07%	1:03:00
14.3.	10E3	PRANÍ	12:45	13:13	13,83	20	980	13,83	22,27	-	61,03%	-	0:28:00
	10E3	SUŠENÍ	13:40	14:29	13,83	50	5	22,27	13,82	13,8	0,0007%	-0,22%	0:49:00
	10E3	PRANÍ	14:46	15:04	13,82	20	980	13,82	22,35	-	61,72%	-	0:18:00
	10E3	SUŠENÍ	15:10	15:57	13,82	50	5	22,35	13,8	14,8	0,0014%	7,09%	0:47:00

Záznamový list - Použití ručníku

Označení nakládky	1E	2E	3E	4E	5E2	6E3	7E3	8E3	9E3	10E4
Hmotnost suché nakládky	16,3 kg	17,8 kg	16,1 kg	14,3 kg	17,9 kg	16,1 kg	14,1 kg	17,9 kg	16,2 kg	13,8 kg
Počet ručníků v nakládce	34	38	33	30	37	35	30	37	34	28
Číslo bloku	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4
Označení ručníků	5633	5633	5844	5633	5844	5633	5844	5633	5844	5886
	5743	5743	5413	5743	5413	5743	5413	5743	5413	5589
	5798	5798	5886	5798	5886	5798	5886	5798	5886	6183
	5400	5400	5787	5400	5787	5400	5787	5400	5787	rv2
	5853	5853	5589	5853	5589	5853	5589	5853	5589	6326
	5655	5655	6139	5655	6183	5655	6183	5655	6183	6084
	5556	5556	6117	5556	6139	5556	6117	5556	rv2	6073
	5688	5688	6106	5930	6117	5688	6084	5688	6117	6194
	5930	5930	6084	5721	6106	5930	6073	5930	6326	6315
	5677	5677	6073	5908	6084	5854	6315	5854	6084	6139
	5721	5721	6326	5809	6073	5721	6249	5721	6073	6249
	5908	5908	6315	5666	6326	5908	6337	5908	6194	6337
	5919	5919	6293	5776	6315	6348	6238	6348	6315	6238
	5809	5809	6249	5567	5677	5809	6216	5809	6139	6216
	5820	5820	6337	5897	6293	6304	6205	6304	6249	6205
	5666	5666	6238	5710	6249	5666	5435	5666	6337	5435
	5776	5776	6216	5875	6337	5776	6172	5776	6238	6172
	5567	5567	6205	5611	6238	5567	6161	5567	6216	6161
	5897	5897	6194	5941	6216	5897	6128	5897	6205	6128
	5854	5854	6172	5732	6205	5754	rv5	5754	5435	rv5
	5622	5622	6161	5842	6194	5710	rv4	5710	6172	rv3
	5754	5754	6128	5446	5435	5875	rv3	5875	6161	rv1
	5710	5710	rv5	5765	6172	5611	rv1	5611	6128	6403
	5875	5875	rv4	5578	6161	5941	6403	5941	rv5	5941
	5611	5611	rv3	5600	6128	5732	5941	5732	rv4	66062
	5941	5941	rv2	5831	rv5	5842	66062	5842	rv3	6392
	5732	5732	rv1	6260	rv4	5446	6392	5446	rv1	6359
	5842	5842	6403	5600	rv3	5765	6370	5765	6403	6450
	5446	5446	5941	6282	rv2	5578	6359	5578	5941	
	5765	5765	66062	6227	rv1	5600	6450	5600	66062	
	5578	5578	6392		6403	5831		5831	6392	
	5600	5600	6370		5941	6260		6260	6370	
	5435	5435	6359		66062	5600		5600	6359	
	5831	5831			6392	6282		6282	6450	
		6260			6370	6227		6227		
		5600			6359			6095		
		6282			6450			6106		
		6227						5677		

Záznamový list hmotnost a označení

Označení ručníku	Hmotnost před	Označení ručníku	Hmotnost před	Označení ručníku	Hmotnost před	Označení ručníku	Hmotnost před	Označení ručníku	Hmotnost před
-	[g]	-	[g]	-	[g]	-	[g]	-	[g]
5457	377,2	5677	460,6	5567	464	5732	469,8	5844	435
5490	386	5721	474,6	5897	474,2	5842	474	5413	454,8
5633	448,2	5908	476,6	5854	481,8	5446	467,4	5886	477,6
5743	458,5	5468	382,4	5545	367,8	5765	467,4	5787	498,7
5798	471,2	5919	481,4	5622	461	5534	383,2	5589	450,2
5699	362,6	5600	463,8	5754	465,8	5578	443,2	6029	427
5400	475,4	5809	477,6	5710	446,2	5600	477,2	6018	379,8
5853	451	5446	377,2	5875	449,2	5435	474,4	6007	383
5655	487,8	5820	478,8	5501	393	5831	472,6	5996	415
5556	496	5666	454,2	5512	371,4	6293	484,6	5985	397,8
5688	478,4	5776	471	5523	367,4	6282	482,4	5974	413,2
5930	493	5479	375,4	5611	453,8	6271	466	5963	408,6
6182	467,4	6205	489,8	5941	491,8	6260	459,8	5952	391,4
6117	480,4	6194	489,8	5424	460,8	6249	493,4	6040	379,6
6106	474,4	6183	485	rv1	493,4	6337	491	6051	386,4
6095	498,2	6172	484,6	6403	459	6238	477,2	6150	507
6084	461	6161	475	rv9	414,6	6227	461,4	6139	500
6073	455,2	rv6	391,8	rv8	371,4	6216	488,8	6359	417,8
6326	490	rv5	469,2	rv7	394,6	6392	455,8	6348	480,6
6315	492,2	rv4	464,6	5941	486	6381	461,8	rv10	415,6
6304	495	rv3	518,6	66062	459	6370	491,4	rv2	522,4