

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Gavura**
Osobní číslo: **T17000363**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Netkané a nanovláknenné materiály**
Název tématu: **Koncept mechanické recyklace PU pěny**
Zadávací katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši na téma recyklace PU pěn
2. Navrhněte koncept mechanické recyklace PU pěn pro průmyslové využití
3. Realizujte a ověřte navržený koncept
4. Vytvořte zkušební vzorky s PU recyklátem a ověřte jejich vlastnosti
5. Získané výsledky diskutujte

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40-60 dle potřeby

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. UHLIG, Konrad. Polyurethan-Taschenbuch. 3. 2005. ISBN 978-3-446-40307-9.
2. THOMAS, Sabu. Recycling of polyurethane foams. Waltham, MA: Elsevier, 2018. ISBN 9780323511339.
3. Mechanical Properties of Biological Materials. PAL, Subrata. Design of Artificial Human Joints & Organs - 2014. Springer US, 2014, s. 23-40. ISBN 9781461462552.
4. MLEZIVA, Josef. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 8085920727.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání diplomové práce: 19. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 7. prosince 2018


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka





Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 19. ledna 2018



Koncept mechanické recyklace PU pěny

Diplomová práce

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106T018 – Netkané a nanovláknenné materiály
Autor práce: **Bc. Jan Gavura**
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.





The concept of mechanical recycling of PU foam

Master thesis

Study programme: N3106 – Textile Engineering
Study branch: 3106T018 – Nonwoven and Nanomaterials
Author: **Bc. Jan Gavura**
Supervisor: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.



Tento list nahradte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Bc. Ondřejovi Novákovi, Ph.D za věnovaný čas a úsilí při psaní diplomové práce. Dále pak své rodině za výpomoc při konstrukci recyklačního nástroje, firmě Škoda a.s. za poskytnutý materiál a v neposlední řadě firmě Proseat, zejména pak panu ing. Petru Jandovi, za výpomoc při testování finálního výrobku a odborné prezentaci automatizované linky pro výrobu PU pěn.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá mechanickou recyklací PU pěny a možným vývojovým řešením výroby PU pěny pro sedačky v automobilovém, ale i jiném průmyslu. Tyto sedačky jsou vyráběny ve velkém počtu a průmyslově se vyrábí se nejčastěji z polyuretanové pěny. Tento materiál má velmi dobré mechanické, fyzikální a životnostní vlastnosti. Avšak z ekologického hlediska je PU pěna neúnosná a postupně degraduje. Cílem této práce je navrhnout zařízení, který dokáže zpracovat PU pěnu na druhotný materiál a implementovat ho, do již automatizovaných postupů. V závěru je diskutována využitelnost zařízení a použitelnost takto vyráběných PU pěn do automobilového průmyslu.

Anotation

This diploma thesis deals with mechanical recycling of PU foams and possible development solutions for PUF for car seats and other. These seats are produced in large numbers and are industrially made of polyurethane. This material has amazing mechanical, physical and life properties. However, from an environmental point of view, PU foam is unacceptable and non-biodegradable. The aim of this work is to design a machine that can process PU foam onto the secondary material and implement it into automated processes. In the end, the disused usability of the machine and the usability of the PU foams thus produced in the automotive industry.

Klíčová slova: polyuretan, polyuretanová pěna, recyklace

Key words: polyurethane, polyurethane foam, recycling

Seznam vzorců:

1. Vznik isokyanátu
2. Vznik uretanu
3. Výpočet hustoty
4. Objem porozity
5. Výpočet porozity
6. Darcyho zákon
7. Statistická významnost F-test

Obsah

Úvod a cíle.....	5
1.REŠERŠE	6
1.1 Polyuretanová pěna.....	6
1.2 Aplikace polyuretanové pěny v automobilovém průmyslu.....	8
1.3 Chemické složení PU pěn	9
1.3.1 Výchozí suroviny	10
1.4 Vlastnosti PU pěn.....	15
1.4.1 Hustota.....	16
1.4.2 Tuhost (IFD)	16
1.4.3 Únava.....	17
1.4.4 Nosnost	17
1.4.5 Pevnost – odolnost vůči trhání.....	18
1.4.6 Elasticita – Hystereze.....	18
1.4.7 Porozita	18
1.4.8 Hořlavost.....	19
1.4.9 Prodyšnost	20
1.4.10 Struktura Pěny	20
1.5 Recyklace PU pěn	21
1.5.1 Mechanické postupy recyklace.....	21
1.5.2 Přebroušení.....	22
1.5.2.1 Dvouválcový mlecí proces	22
1.5.2.2 Peletový mlýn	23
1.5.2.3 Řezání nožem	23
1.5.3 Chemické postupy recyklace	23
1.5.3.1 Glykolýza	23

1.5.3.2	Hydrolýza	24
1.5.3.3	Alkoholýza	24
1.5.4	Termické postupy recyklace	24
1.5.4.1	Pyrolýza	25
1.5.4.2	Zplyňování	25
1.5.4.3	Hydrogenace	25
1.6	Recyklace automobilových pěn.....	26
1.7	Automatizovaná výroba PU pěny.....	29
2.	PRAKTICKÁ ČÁST	31
2.1	Výběr a ověření pracovních nástrojů	31
2.1.1	Nástroje s rotačním pohybem	31
2.1.1.1	Drátěný kotouč.....	32
2.1.1.2	Lamelový brusný kotouč	34
2.1.2	Nástroj s přímočarým pohybem.....	35
2.1.2.1	Brusný pás.....	35
2.2	Zkušební vzorek.....	35
2.2.1	Zkušební vzorek – testování vybraných nástrojů.....	36
2.3	Návrh a vývoj zařízení.....	39
2.3.1	Realizace zařízení	41
2.4	Návrhy propojení stroje s linkou.....	44
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	46
3.1	Ověření zařízení.....	46
3.2	Výroba vzorků s recyklovanou PU pěnou	48
3.3	Stanovení tvrdosti	52
4.	DISKUZE.....	56
5.	ZÁVĚR	59
6.	PŘÍLOHY	60
7.	LITERATURA	63

Úvod a cíle

Polyuretanové pěny, jakožto komfortní doplněk, mají čím dál tím větší zastoupení v automobilovém průmyslu. Používají se ve všech dopravních prostředcích, jako jsou auta, autobusy, letadla, lodě a jiné. Mohou se používat i v ostatních odvětvích, kde je zapotřebí komfortu (například nábytek). Při konstruování sedadel pro automobilový průmysl musí být brán zřetel na bezpečnost, design, komfort a funkčnost. V dnešní době sedadla v automobilech neslouží již pouze pro sezení, ale mají více funkcí jako je například vyhřev, větrání, masáž, odkládací prostor, nesení airbagů apod.

Pro tyto účely je nejvhodnější polyuretanová pěna vzhledem k její snadné vyrobiteľnosti, tvarovatelnosti, trvanlivosti a tlumení. Další velkou výhodou je téměř okamžitý návrat do původního tvaru po mechanickém namáhání. Největší nevýhodou PU pěn jsou sloučeniny, které jsou nutné k její výrobě. Tyto sloučeniny jsou extrémně jedovaté a až následnou syntézou se z nich stane zdraví neškodná PU pěna. Proto v provozech, kde se PU pěny vyrábí, je nutné dodržovat řadu provozních předpisů a dbát zvýšené opatrnosti [4, 16].

PU pěny se dnes již recyklují, a to různými postupy: chemické, termické a mechanické, ale jejich recyklát není používán k výrobě nové PU pěny. Cílem této diplomové práce je navrhnout stroj na zpracování PU pěny na druhotnou surovinu a možnost její aplikace do automatizované produkce. Z důvodů utajení některých skutečností jsou některé části napsané pouze na obecné úrovni, bez konkretizace parametrů nebo konstrukčních detailů.

1. REŠERŠE

PU pěna je chemická sloučenina s jedinečnými mechanickými vlastnostmi, kterých se využívá zejména pro komfort, a to v různých výrobních odvětvích. Její četné využití také souvisí s jednoduchou výrobou a úpravou, takže se pomocí ní dá tvořit design celkového produktu. PU pěna při svém vzniku kopíruje své okolí, a dají se tak vytvořit tvarově komplikované výrobky.

PU pěna se v základu skládá ze dvou produktů – polyalkoholu a di-izokyanátu, které jsou vyráběny zejména fosgenací aminů [4]. Di-izokyanáty jsou velice reaktivní a škodlivé pro životní prostředí, až následnou syntézou s polyoly vzniká stabilní PU pěna [4]. PU pěny je možné recyklovat, a to různými postupy: chemické, mechanické a termické. Každý z nich vytvoří jiný recyklát, který je vhodný na jiné použití. Tato diplomová práce se zabývá mechanickou recyklací a možnostmi aplikace recyklátu zpět do tvorby nové PU pěny.

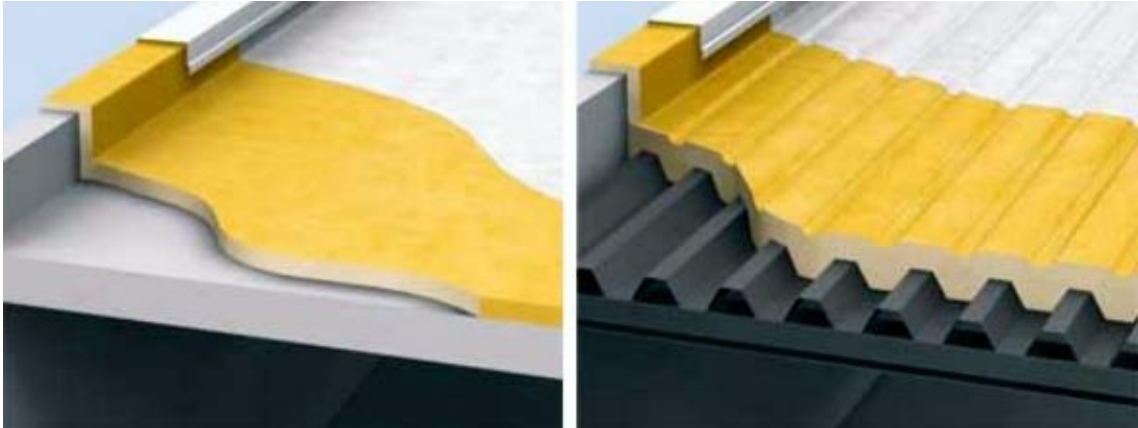
Aplikace mechanicky recyklované PU pěny lze zavést do procesu výroby nové PU pěny, a to díky speciálním dávkovacím hubicím, které jsou schopny přivádět jakýkoliv další materiál, který je možné dávkovat pod tlakem. Česká pobočka firmy PROSEAT momentálně touto hubicí nedisponuje a nejbližší se nachází až v Belgii. Celý proces nebylo možné vyzkoušet kvůli neúměrně dlouhé čekací lhůtě, zastavení výrobní linky atd. Další potíže jsou spojeny s transportem materiálu tam i zpět a nemožnost výrobní proces sledovat/kontrolovat – být fyzicky přítomen.

1.1 Polyuretanová pěna

Patří do desítky nejmasověji vyráběných polymerů (ve světě cca 10 mil. tun za rok). Polyuretanové pěny představují jednu z nejuniverzálnějších tříd polymerních materiálů, které se v současné době používají v několika aplikačních polích. Uspořádáním polyuretanového řetězce je možné dosáhnout několika hustot, morfologií, tuhosti nebo právě naopak pružnosti, které umožňují, aby polyuretanové pěny splňovaly širokou škálu technických požadavků. Jsou to například tvrdé pěny, integrální pěny, měkké pěny, elastomery, barvy, těsnění, lepidla a jednosložkové či vícesložkové pěny v tlakových nádobách [1, 2, 4].

V průmyslu a stavební výrobě se uplatňují díky svým výborným izolačním a fyzikálně technickým vlastnostem různé typy PU pěn. Z těchto pěn je to především tvrdá PU pěna s uzavřenou strukturou buněk s hustotou 10-800 kg/m³, která je zpracovávána

do konečného výrobku následujícími technologickými postupy: litím, nástřikem nebo nástřikem „na místě“ [2]. Tvrdá pěna má výborné tepelně izolační vlastnosti (obr.1), dobrou adhezi ke dřevu, betonu, kovům a keramice [1,2]. Naproti tomu v čalounictví, automobilovém a balicím průmyslu jsou užívány pěny měkké, které poskytují komfort a funkčnost [1]. Na Obr. č 1 je ukázka použití tvrdé PU pěny.



Obrázek 1 tvrdá PU pěna použitá jako izolant [20]

Na následujícím obrázku je ukázána měkká PU pěna, použitá v hlavových opěrkách autosedaček (obrázek 2).



Obrázek 2 měkké pěny a jejich použití [22]

1.2 Aplikace polyuretanové pěny v automobilovém průmyslu

Polyuretanová pěna se v automobilovém průmyslu nachází zejména na sedačkách, ale můžeme se s ní setkat také například ve výplních dveří, podlahy, či ve stropě, to vše za cílem zlepšení komfortu a designu. Tato práce se zabývá především pěny používanými na sedačky, řešení je však principiálně použitelné pro PU pěny bez ohledu na jejich použití.

Automobilové sedačky v dnešní době neslouží pouze k sezení, ale jsou nedílnou součástí auta, s kterou běžný uživatel přichází nejvíce do kontaktu. Designové požadavky sedaček musí splňovat určité náležitosti, normy, funkce, bezpečnost a komfort. Na Obr. č 3 je ukázka aplikace PU pěny v automobilovém průmyslu



Obrázek 3 měkké pěny používané v automobilovém průmyslu [22]

1.3 Chemické složení PU pěn

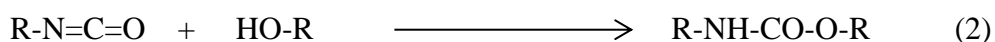
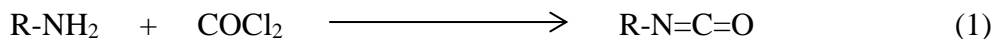
Obecně jsou výchozími surovinami pro plasty zemní plyn, uhlí, ale především ropa. Plasty jsou organické sloučeniny, které obsahují především uhlík, dusík, síru a chlór. Jsou lehké a převážně dostatečně odolné povětrnostním vlivům. Výroba plastických hmot probíhá pomocí chemické reakce, která se obecně nazývá syntéza [2].

Polyuretan patří mezi polymery, což jsou látky tvořené molekulami (makromolekulami), pro které je charakteristické mnohonásobné opakování jednoho nebo více druhů atomů nebo atomárních skupin (konstitučních jednotek), které jsou navzájem spojeny v tak velkém počtu, že neexistují vlastnosti, které se znatelně změní přidáním nebo odebráním jedné nebo více těchto jednotek [17].

Konstituční jednotka je atom, nebo skupina atomů, které se nacházejí v molekulách oligomeru nebo polymeru. Opakující se konstituční jednotka je nejmenší konstituční jednotka, jejímž opakováním lze popsat polymerní řetězec [17]. Sloučenina tvořená molekulami, z nichž každá může poskytnout jednu nebo více konstitučních jednotek se nazývá **monomer**. Monomer (mér) je největší konstituční jednotkou vznikající v průběhu polymerizace z jedné molekuly monomeru [17]. Polymery vznikají tzv. **polymerizací** (řetězovou polyreakcí). V řetězové polyreakci vznikají makromolekuly mnohonásobně a opakující adicí molekul mérů na růstová centra. **Růstová centra** jsou vysoce reaktivní meziproducty (radikály, ionty nebo komplexní sloučeniny). Každá řetězová polyreakce se skládá z několika elementárních reakcí. Mezi ty hlavní patří *iniciace*, *propagace* (růst řetězce) a *termice* (ukončení růstu řetězce). V **iniciaci** se molekula monomeru aktivuje iniciátorem resp. produktem jeho rozkladu nebo dodáním vhodné energie. Tím vzniká reaktivní meziproduct – růstové centrum [17].

Polymery vniklé reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy nazýváme polyuretany. V rovnici (1) je zobrazen vznik isokyanátu a v rovnici (2) je zobrazen vznik polyuretanu, kde se k isokyanátu přidává alkohol [4].

Chemické rovnice:



Tato hlavní růstová reakce je často záměrně, nebo samovolně doprovázena dalšími vedlejšími reakcemi, kterými vznikají jiné než uretanové strukturální jednotky. Isokyanáty reagují totiž s mnoha sloučeninami obsahujícími aktivní vodíkové atomy [4].

Hlavní řetězec polyuretanů obsahuje kyslík, který je činí ohebnějšími. PU je velice odolný vůči zmýdelnění alkáliemi či kyselinami. Přípravuje se z polyesterů s dvěma hydroxylovými skupinami, izokyanátu a vody. Při výrobě PU je velice důležité dávkování s ohledem na finální produkt. Reakcí vody a diizokyanátu se uvolňuje oxid uhličitý, který vytváří strukturu pěny. Během procesu vypěňování pěna kopíruje formu, v které reakce probíhá, tímto způsobem se mohou vytvářet libovolné finální tvary výrobku, či testovací kostky [3].

1.3.1 Výchozí suroviny

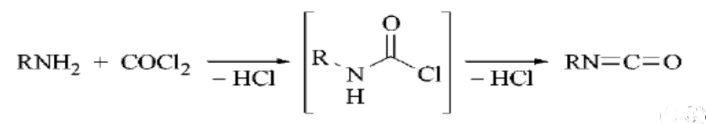
Základními surovinami pro přípravu polyurethanů jsou polyisokyanáty, polyoly, extendery (prodlužovače řetězců) a katalyzátory [4]. Na Obr. č 4 je znázorněn vznik polyisokyanátu.

Di-/Polyisokyanáty

Přibližně 95% produkce polyurethanů je založena na aromatických polyisokyanátech, které jsou podstatně reaktivnější i levnější než alifatické. Dominují diisokyanatotoluen a diisokyanatodifenylmethan [4].

Isokyanáty jsou průmyslově vyráběny fosgenací aminů:

1. studená fosgenace - kde reagují primární aminy s fosgenem v rozpouštědle (dichlorbenzen) při 0° až 50°C za tvorby karbamidchloridu a hydrochloriduaminů
2. horká fosgenace – při 170°- 180° C a reakcí s dalším fosgenem [4]



Obrázek 4 Vznik isokyanátu [4]

2,4- a 2,6-diisokyanatotoluen

2,4- a 2,6-diisokyanatotoluen se používá převážně u výroby měkkých pěn a zčásti i elastomerů. Isokyanátová skupina v poloze 4 u 2,4-izomeru je při 20°C přibližně 18krát reaktivnější než skupina v poloze 2. Tento diisokyanát lze proto dobře použít k odstupňované adiční reakci – k výrobě netěkavých předpolymerů.

4,4-Diisokyanatodifenylmethan

4,4-Diisokyanatodifenylmethan slouží pro přípravu elastomerů a pro polotvrdé a tvrdé integrální pěny. Více používaný než pevný 4,4-diisokyanatodifenylmethan je surový produkt připravený z anilinformaldehydového kondenzátu, který je kapalný [4].

1,5-Diisokyanatonaftalen

1,5-Diisokyanatonaftalen je vysoce reaktivní a používá se pro mechanicky náročné elastomery [4]. Nevýhodou aromatických diisokyanátů je tendence jejich produktů ke žloutnutí vlivem světla a kyslíku. Tento nedostatek nevykazují alifatické a cykloalifatické diisokyanáty [4].

1,6-Diisokyanatohexan

1,6-Diisokyanatohexan slouží hlavně pro přípravu nežloutnoucích elastomerů a fyziologicky nezávadných lékařských meziproduktů [4].

Polyoly

Další základní složkou jsou polyoly. Od ostatních látek se odlišují krátkými řetězci, a nebo nízkou molekulovou hmotností. Jsou to vícesytné alkoholy obsahující 2 a více hydroxylových skupin.

Základní dělení polyolů:

Dle počtu hydroxylových skupin:

- Dioly (2 hydroxyly)
- Trioly (3 hydroxyly)
- Tetraoly (4 hydroxyly)

Dle polohy hydroxylů:

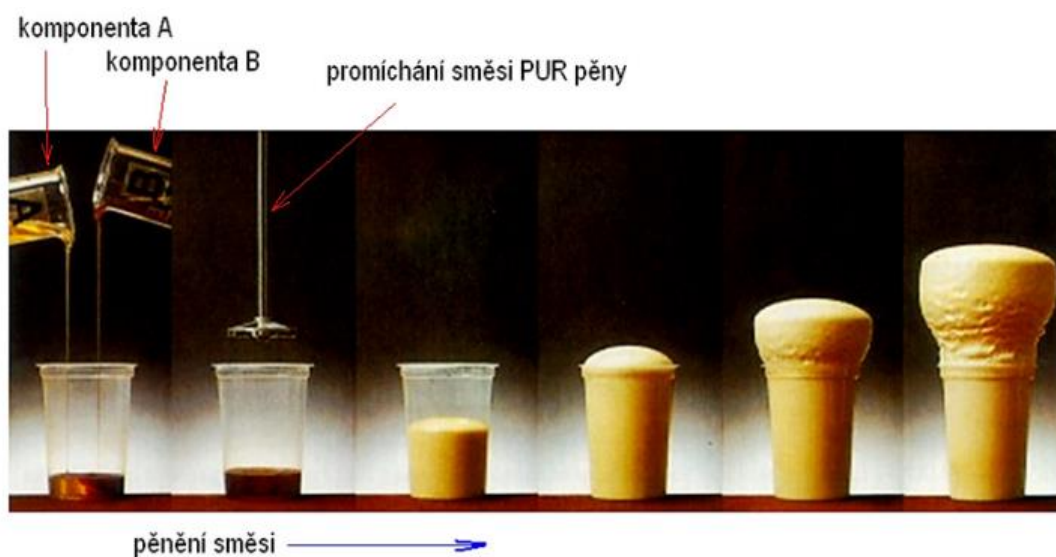
- Vacinální (hydroxyly se vyskytují na vedle sebe se nacházejících uhlících, např. ethylenglykol)
- Geminální (hydroxyly se vyskytují na stejném uhlíku, např. methandiol)
- Ostatní

Pro výrobu PU se nejčastěji využívají polyetheralkoholy a polyesteralkoholy. Do této složky se přidává většina aditiv, která jsou nutná k zajištění finální kvality výrobku (stabilizátory, retardéry hoření, katalyzátory, aj.). Jedná se o vícesytné alkoholy a dělíme je na:

Polyetheralkoholy – vyráběné reakcí epoxidu (oxiranoalkenoxid) se směsí obsahující aktivní vodík.

Polyesteralkoholy – vyráběné polykondenzací multifunkční směsi kyselina karboxylové a hydroxylové [31].

Na následujícím obrázku je zobrazen vznik PU pěny (Obr. 5)



Obrázek 5 Chemické tváření PU pěny [23]

Fyzikální vlastnosti PU ovlivňuje do velké míry výběr iniciátoru, plnidla a molekulová hmotnost polyolu. Mezi důležité charakteristiky patří složení molekuly, iniciátor, molekulová hmotnost, viskozita a procentuální zastoupení primárních hydroxylových skupin [7]. V následující tabulce jsou zobrazeny technicky důležité polyoly (Tab.1).

Tabulka 1 Technicky důležité polyoly [13]

Strukturální vzorec	název
$\text{HO}-\text{R}-\text{O}-\text{R}-\text{OH}$	Polyeter - polyol
$\text{HO}-\text{R}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}-\text{OH}$	Polyester - polyol
$\text{HO}-\text{R}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}-\text{OH}$	Carbonat - Poylester - polyol
$-\text{R}'-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}-\text{R}-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}-$	Polymočovina – disperze v polyolu
$\begin{array}{c} \text{---C---CH---CH}_2\text{---CH---} \\ \quad \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{Ph} \quad \text{CN} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{HO---R---O---R---OH} \\ \quad \quad \quad \\ \text{CH}_2\text{---CH---Ph} \quad \text{CH}_2\text{---CH---Ph} \\ \quad \quad \quad \end{array}$	Akrylonitril-styren polyole nebo Polymer-polyole
$\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{O}-\text{R}-\text{NH}_2$	Polyeter - Polyamine
$\text{HO}-\text{R}-\text{O}-\text{R}-\overset{\text{R}'}{\text{N}}-\text{R}-\text{O}-\text{R}-\text{OH}$	Aminopolyeter-Polyol
$\text{X}-\text{R}-\text{(O)}_n\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{P}}-\text{(O}-\text{R}-\text{OH})_2 \quad n=0,1$	Retardanty hoření

Pomocné látky

Kromě základních surovin polyisokyanátu a polyolu jsou při výrobě PU používány další pomocné látky (viz Tab. 2).

Tabulka 2 vybrané pomocné látky při tvorbě PU [13]

Pomocné látky	Využití
katalyzátory	vždy
síťovadla	často
tenzidy (PAL)	většinou
retardéry hoření	dle potřeby
plniva	dle potřeby
přípravky proti stárnutí	často
barviva	dle potřeby

Katalyzátory

Katalyzátory slouží k urychlení reakce. U terciálních aminů se nejčastěji používají organické nebo Ti – sloučeniny [13].

Povrchově aktivní látky (PAL)

Správné použití PAL je rozhodující při výrobě PU pěn. Jejich účinnost je v PU pěnách založena hlavně na jejich povrchové aktivitě a jejich vzájemném působení s chemickými strukturami polymerní pěny. Funkce PAL spočívá v zachování termodynamicky nestálého stavu pěny během doby stoupání povrchovými silami, dokud není vytvrzena. PAL působí dvěma mechanismy, za prvé snižují povrchové napětí směsi surovin a za druhé poskytují emulzi pro celý systém.

Ideální PAL pro PU pěnu by měly umožnit všem buňkám zůstat neporušenými až do dosažení maximálního objemu a v tomto okamžiku umožnit otevření stěn bez toho, aby došlo k porušení kostry pěny [12,13].

Retardanty hoření

Přidávají se, aby snížily hořlavost PU. Pro tento účel jsou vhodné jak anorganické (Aluminium-oxidhydrate, Ammoniumpolyphosphate), tak organické (Chlor/Brom a/nebo Fosfor) [12,13].

Plniva

Používají se ke zlevnění PU a pro zlepšení jejich fyzikálních vlastností. K těmto účelům se do PU přidávají například skleněná vlákna [12,13].

Barviva

Používají se anorganická či organická barviva nebo pigmenty rozptýlené v polyolu. Jsou k dispozici ve formě pasty nebo těsta [12,13].

Extendery

Extendery jsou činidla s nízkou molekulovou hmotností, které produkují známé elastomerní vlastnosti PU. Typicky mají extendery molekulové hmotnosti v rozmezí od 40 do 300 Daltonů (pozn.: $1 \text{ Da} = 1,660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$) a lze je klasifikovat buď jako hydroxyl, nebo amin. Jako extendery jsou označovány difunkční sloučeniny, pokud se jedná o více-funkční sloučeninu je označována jako zesíťovač. Extendery obsahující hydroxylové skupiny často pomalu reagují s polyisokyanátem a vyžadují jeden nebo více katalyzátorů k dosažení rychlé reakce. Tímto katalyzátorem jsou typicky organokovové sloučeniny, jako například dibutylcindilaurát [12,26].

1.4 Vlastnosti PU pěn

Mechanické vlastnosti jsou důležitou hodnotou poukazující na využitelnost finálního výrobku. Stanovují se zejména následující parametry: hustota buněk, obsah otevřených buněk, integrita buněk a expanzní poměr. Tyto parametry ovlivňují strukturu buněk a jsou řízeny technologií vypěňování [8].

Fyzikální a chemické vlastnosti - PU pěny jsou lehké suroviny, které mohou obsahovat 98% až 99% vzduchu – v případě pěn s uzavřenými buňkami. Mechanické vlastnosti závisí v podstatě na hustotě. [13]

Z chemického hlediska nejsou PU pěny nikdy „čisté“ plasty, jako je PVC z vinylchloridu nebo PET z etylenu, ale jsou to vždy chemicky strukturně smíšené polymery. Uretanová skupina, je v makromolekule často zahrnuta pouze v menší míře. Tabulka 3 porovnává hustoty některých materiálů v porovnání s PU pěnou.

Tabulka 3 – Srovnání hustoty vzduchu, vody a vybraných materiálů [13]

Název	Hustota v kg/m ³
Suchý vzduch	1,3
Nejlehčí PU (měkká) pěna	10
Korek	200 do 350
Suché dřevo	400 do 800
Nejtěžší PU (integrální) pěna	800 do 900
Voda	1000
Hořčík	1740
Hliník	2702
Titan	4510
Konstrukční ocel	7850

1.4.1 Hustota

Hustota pěny je funkcí chemie používané k výrobě pěny, přísad ke zvýšení hustoty a jakýchkoliv přísad ke zlepšení vlastností pěny při spalování. Objemová hustota je jednou z nejdůležitějších vlastností měřených u pěn, která je vyjádřena v kg/m³.

$$\text{Výpočet hustoty: } \textit{Hustota} = \frac{\text{hmotnost}}{\text{délka} \cdot \text{šířka} \cdot \text{výška}} \quad (3)$$

Při použití přísad nebo plniv při výrobě pěny bude hustota pěny vyšší než hustota polymeru. Obecně řečeno, čím vyšší je hustota polymeru pěny, tím vyšší je cena pěny. Avšak tato pěna má lepší fyzikální vlastnosti a delší trvanlivost. Jednou z typických vlastností pro vysokou hustotu pěny je, že se po mechanickém namáhání vrací do původního stavu a lépe si udrží své původní vlastnosti [7].

1.4.2 Tuhost (IFD)

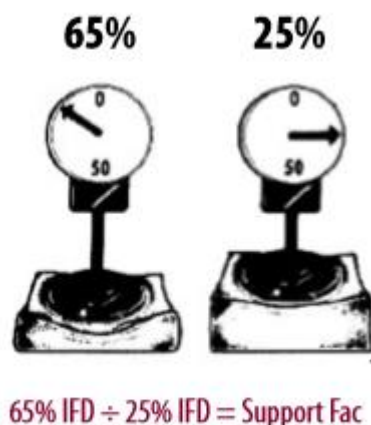
Odlehčovací síla v tahu (IFD – Indentation Force Deflection) je měření pevnosti pěny. Pevnost je nezávislá na hustotě pěny, i když panuje předpoklad, že hustší pěny mají vyšší pevnost, ale může nastat i opačný jev, že pěny s vysokou hustotou jsou méně pevné než pěny s nízkou hustotou. Specifikace IFD se týká komfortu. Jedná se o měření povrchového pocitu pěny a je měřena odsáváním 25% pěny z její původní výšky [7].

1.4.3 Únava

V praxi existuje několik testů, které se používají k určení trvanlivosti pěny, tedy jak dobře pěna zachovává své původní vlastnosti. Některé jsou standartními laboratorními testy a jiné byly vyvinuty výrobci pěn, ale většina z nich je založena na ohýbání nebo stlačení pěny v určitém počtu cyklů a pod různými úhly a vyhodnocováním jejich vlastnosti před a po testování. Při testování únavy mohou být vzorky stlačeny tisíckrát až několik tisíckrát a nakonec se stanoví procento ztráty IFD. Kratší testy poskytují informace, kolik tuhosti může pěna ztratit, zatímco delší testy poskytují informace o celkové odolnosti pěny (nosnost, tvrdost, pevnost, apod.) [7].

1.4.4 Nosnost

Druhé měření IFD se někdy provádí stlačením pěny o 65% původní výšky. Toto druhé měření IFD slouží k určení schopnosti pěny poskytnout hlubokou podporu a bývá označován jako SAG faktor. Typicky, čím větší rozdíl mezi 25% IFD a 65% IFD, tím větší je schopnost pěny podporovat zatížení. Poměr 65% IFD dělený 25% IFD se nazývá pěnový podpůrný faktor. Podpůrné faktory pěny se pohybují od 1,5 do 2,6. Čím vyšší je číslo, tím lepší je schopnost pěny poskytnout podporu. Pěny s vyššími podpůrnými faktory nabízejí řadu výhod. Je možné specifikovat nízkou 25% IFD na pěnu s vysokým podpůrným faktorem pro vytvoření extra měkkosti povrchu. Typicky, čím vyšší je hustota pěny, tím lepší je podpůrný faktor [7]. Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma na testování nosnosti PU pěny (Obrázek 6).



Obrázek 6 schéma na testování nosnosti PU pěny [7]

SAG faktor lze ovlivnit dvěma faktory:

1. Hustotou pěny – obvykle vyšší hustota pěny zajistí lepší nosnost
2. Chemickým složením pěny a její výrobní postup [7].

1.4.5 Pevnost – odolnost vůči trhání

U flexibilních PU pěn se také měří jejich odolnost vůči trhání či drcení. Zkoušky pro stanovení těchto vlastností jsou pevnost v tahu, odolnost proti roztržení a prodloužení. Určují schopnost pěny být roztaženy nebo ohnuty bez trhání. Tato měření trvanlivosti jsou zvláště důležitá pro pěny, které obsahují velké množství plniv, jako jsou modifikované pěny. Tyto přísady mohou zvýšit tendenci pěny se trhat nebo roztrhnout. Při specifikaci pěn, které obsahují přísady, se doporučuje zkontrolovat pevnost v tahu, zkoušky roztažení a protržení, aby se zjistilo, zda pěna může vyžadovat speciální manipulaci [7].

1.4.6 Elasticita – Hystereze

Hystereze je dalším laboratorním testem používaným k určení schopnosti pěny zachovat své původní vlastnosti. Při stlačení se pěna vrací do svého původního tvaru s určitým zpožděním. Čím je toto zpoždění menší tím má pěna větší elasticitu a menší hysterezi. Hystereze ovlivňuje schopnost pěny odolávat dynamickým účinkům síly a poukazuje tak na životnost finálního výrobku [7].

1.4.7 Porozita

Pěna je disperzní dvoufázový systém složený z kapaliny nebo pevné fáze a v ní rozptýleném plynu [9]. Porozitu můžeme ovlivnit zejména výběrem surovin a výrobními procesy (tj. polyol, di-isokyanin, voda, pomocné vyfukování, ...). Takto můžeme kontrolovat vývoj plynu, polymeraci stěny buňky a vzpěry během pěnění. Což vede k cílené hustotě pěny, mechanickým vlastnostem, velikosti a otevřenosti buněk.

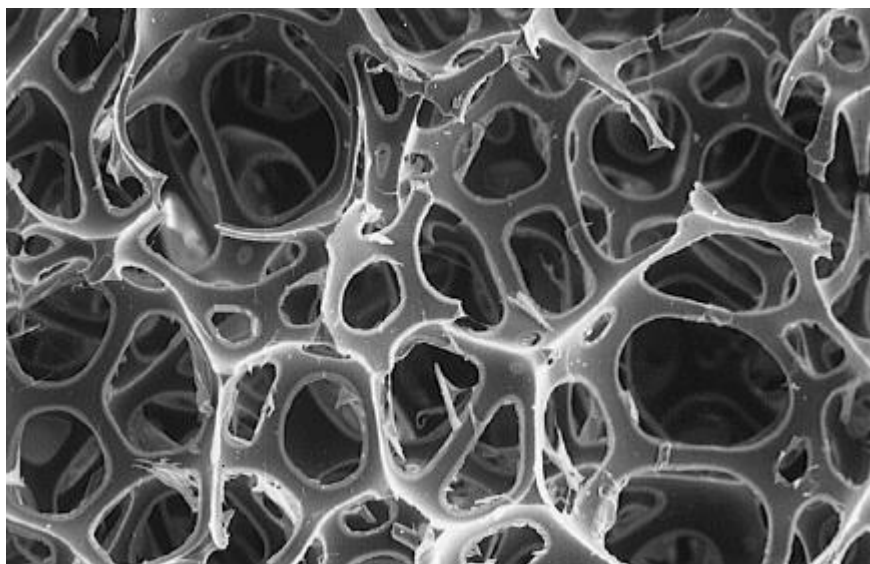
Celkovou porozitu můžeme zjistit několika způsoby:

- Optické metody – mikroskop, elektronový mikroskop, apod.
- Rtuťovou porozimetrií
- Adsorpční hysterezií

Důležitou charakteristikou je porozita, která se dá matematicky vyjádřit podílem celkového objemu pórů k celkovému objemu pěny [10]:

$$\text{porozita} = \frac{V_{\text{pórů}}}{V_{\text{pěny}}} * 100 (\%) \quad (4)$$

Porozita úzce souvisí se zaplněním, které ovlivňuje prodyšnost [9]. Na následujícím obrázku je zobrazen popis buněk v PU pěně (obr.7).



Obrázek 7 Popis buněk v PU pěně [24]

$$\text{Porozita je také definována vztahem: } \psi = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c} = 1 - \mu \quad (5)$$

Kde je ψ značení pro porozitu, V_c je značení pro celkový objem, V je značení pro objem pórů (vzduchu).

1.4.8 Hořlavost

Při výrobě pěny se musí brát zřetel na její finální použití. Hořící PU pěna, stejně jako ostatní organické materiály, vydává při hoření toxiny, z nichž je primární oxid uhelnatý. PU pěna se po zapálení může rychle vznítit a spotřebovává vysoké množství kyslíku, což zapříčiňuje hoření při vysokých teplotách a může vést k nebezpečí udušení. Při vdechování toxinů může dojít ke smrti [7].

Vzhledem k tomu, že PU pěny jsou vyráběny na základě různých receptur, vykazují různé charakteristiky hoření, takže některé druhy pěn nemusí být pro určité použití bezpečné. Byla vyvinuta řada požadavků na odolnost proti spalování u nábytku, automobilovém průmyslu, izolaci apod.

1.4.9 Prodyšnost

Prodyšnost pěny je důležitou charakteristikou, která ovlivňuje výslednou odolnost vůči vnějším silám. Optimální chování PU pěny je při maximální prodyšnosti, tuto vlastnost ji poskytují otevřené buňky [11, 31].

Jedná se o geometrickou charakteristiku související s velikostí pórů což je to schopnost materiálu propouštět tekutiny. Je definována Darcyho zákonem:

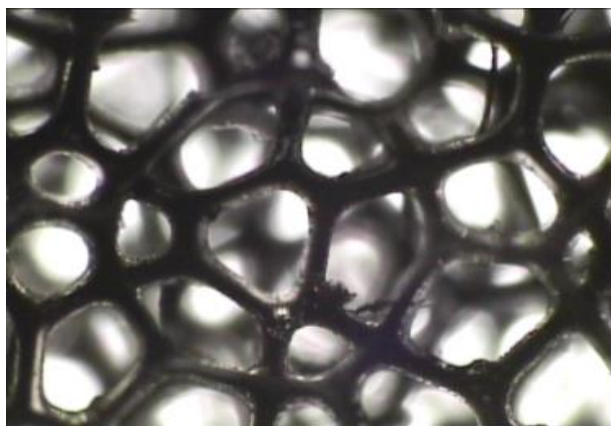
$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (h_a - h_b)} \quad (6)$$

, kde **Q** je průtok pronikající kapaliny v m³/s, **k** je koeficient filtrace nebo Darcyho koeficient, **A** je plocha v m², kterou proudící médium protéká, **h_a** je tlak v místě vstupu média do materiálu, **h_b** je tlak v místě výstupu média z materiálu a **L** je vzdálenost mezi místy *a* a *b* v m [11].

Při zatížení PU pěny se póry uzavírají a snižuje se tak velikost celkového průtoku skrz testovaný materiál. Prodyšnost je velice důležitá zejména u autosedaček, kde se musí sedačky po mechanickém namáhání vrátit do svého původního tvaru [31].

1.4.10 Struktura Pěny

Jedná se o 3D strukturu. K hlavním parametrům pěny patří: objemová hmotnost, odpor vůči stlačení, odpor vůči vtlačení, pevnost v tahu, tažnost, pevnost roztržení, porozita a provzdušnost. Mezi hlavní parametry buňky patří: průměr buňky, hrubost stěny a její velikost. Buňky můžeme rozlišovat na buňky se stejnou strukturou a rozdílnou objemovou hmotností nebo se stejnou objemovou hmotností, ale s rozdílnou strukturou. Na následujícím obrázku je zobrazena struktura PU pěny (Obr. 8) [31].



Obrázek 8 Struktura PU pěny [24]

1.5 Recyklace PU pěn

K recyklaci PU pěn se používá několik různých postupů:

- Mechanické postupy: přebroušení, lepení přidáním pojiva a lisování
- Chemické postupy: alkoholýza, hydrolýza a glykolýza
- Tepelně-chemické postupy: pyrolýza, hydrogenace a zplyňování
- Energetické využití: spalování komunálního odpadu, fluidní pece, rotační pece, tepelná degradace, dvousložkové spalování, hutní recyklace [13].

1.5.1 Mechanické postupy recyklace

Prvním krokem k mechanické recyklaci PU pěn je jejich drcení/sekání na menší částice, které se snáze zpracovávají: vločky, prach, pelety, kostky, atd. K dosažení zmíněných druhotných surovin se používají různé technologie, například pro prach se používá technologie přebrousování. Tento prach je pak možné znovu využít při výrobě nových PU pěn. Dále se pak používá drcení či sekání [13]. Na následujícím obrázku je znázorněn vzorek mechanicky recyklované PU pěny (Obr. 9).



Obrázek 9 mechanicky drcená PU pěna [25]

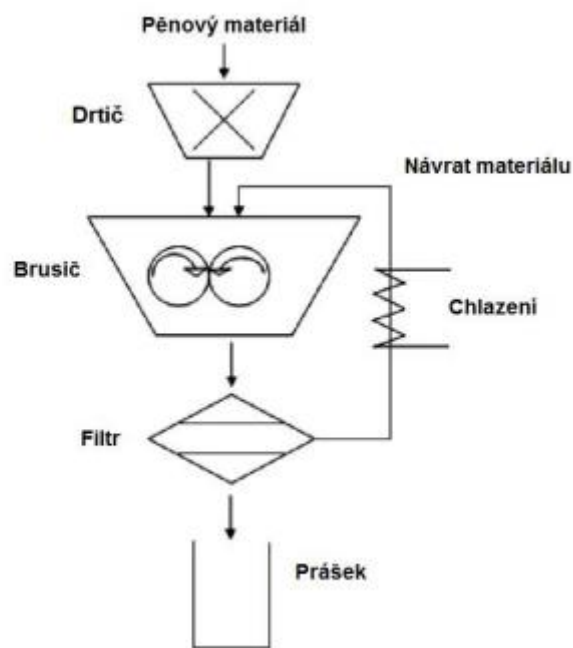
1.5.2 Přebroušení

Pomocí mechanického působení broušení, dochází k rozměňování druhotného materiálu na prach, který má optimální rozměry 100 – 200 μm . Tento prach slouží jako plnivo při výrobě nových PU pěn a elastomerů[13].

K technologii přebroušení se používají následující zařízení: Dvouválcový mlecí proces, peletové mletí a řezání nožem.

1.5.2.1 Dvouválcový mlecí proces

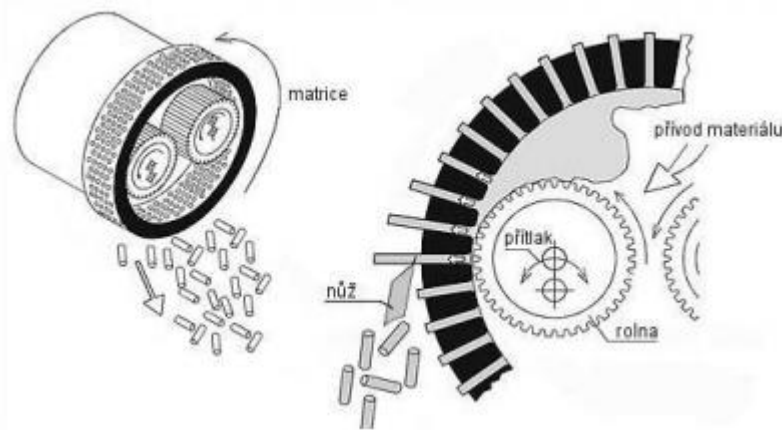
Jedná se o kontinuální zpracování druhotných surovin. Tato technologie spočívá v opačně rotující dvojici válců. Každý z těchto válců rotuje různou rychlostí a zpracovávají se takto nejlépe flexibilní pěny [13]. Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma dvouválcového mlecího procesu (obrázek 10).



Obrázek 10 schéma dvouválcového mlecího procesu [14]

1.5.2.2 Peletový mlýn

Technologie, při které se využívá několika kovových válců, které protlačují zpracovávaný materiál skrz kovovou desku, která je perforovaná [13]. Na následujícím obrázku je zobrazen peletový mlýn. (Obrázek č. 11)



Obrázek 11 schéma peletového mlýnu [18]

1.5.2.3 Řezání nožem

Technologie, při níž jsou používány různé typy řezacích nástrojů, obsahujících velké množství statických nebo rotujících nožů, které rozmělnují PU pěnu na částice o velikosti menší než 0,25 mm [13].

1.5.3 Chemické postupy recyklace

K chemické recyklaci PU pěn se používají následující způsoby:

- Glykolýza
- Hydrolýza
- Alkohololýza

1.5.3.1 Glykolýza

V současnosti se jedná o základní proces pro řízenou recyklaci PU. Při této chemické reakci, reaguje PU pěna s dioly při teplotách nad 200 °C, což vede k reakci, při níž vznikají kapalné produkty. Reakce probíhá ohříváním rozmělněné PU s vysokovroucím glykolem a katalyzátorem. Ke konci reakce se směs ochladí a filtruje [14, 15].

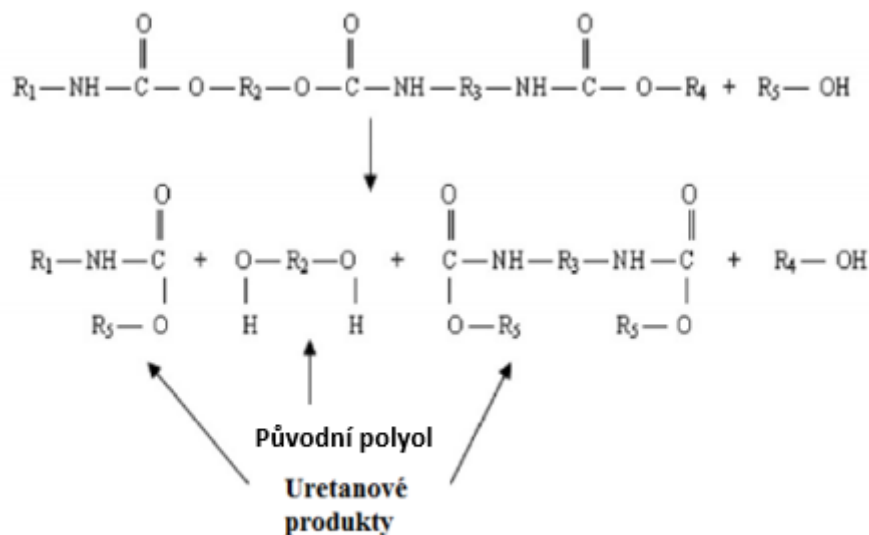
1.5.3.2 Hydrolýza

K hydrolýze se používá přehřátá pára, která funguje jako tepelné médium. Celý proces probíhá v bezkyslíkové atmosféře, během kterého je polymer odbouráván na oleje, plyny a pevné látky [15].

K hydrolýze PU pěn se používá přehřátá pára na 230 – 315 °C. Recyklovaná pěna je přiváděna přímo do reakční komory, kde se dostává do kontaktu s přehřátou pěnou. Tato metoda poskytuje relativně čistý polyol, protože se nepoužívají další chemické přísady [14].

1.5.3.3 Alkoholýza

Alkoholýza je nástavbou hydrolýzy, kde funkci vody nahrazuje alkohol. PU pěna při této reakci reaguje s alkoholem za zvýšeného tlaku a teploty. Alkoholizačním činidlem bývá nejčastěji metanol nebo etanol, a to díky své nízké ceně [14].



Obrázek 12 Alkoholýza PU [28]

1.5.4 Termické postupy recyklace

K termické recyklaci PU pěn se používají následující způsoby:

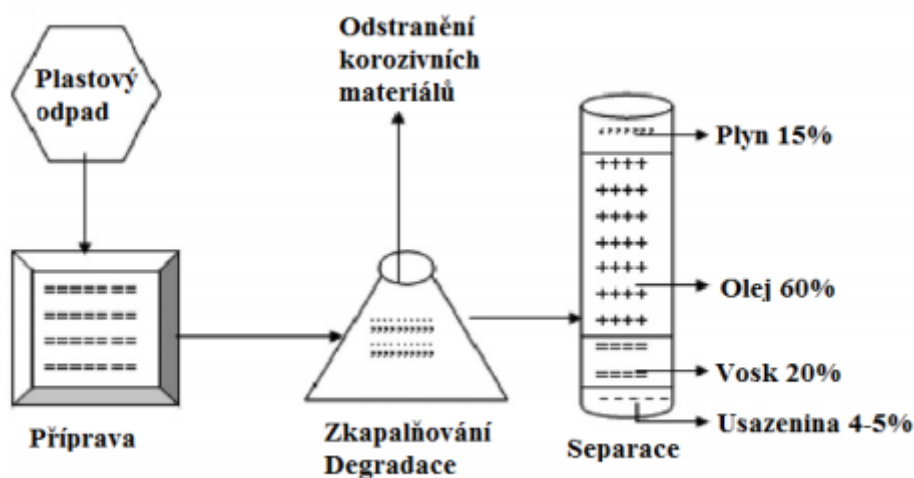
- Pyrolýza
- Zplyňování
- Hydrogenace

1.5.4.1 Pyrolýza

Jedná se o tepelnou depolymeraci, která je prováděna v inertní atmosféře (bez přístupu kyslíku), a to za účelem transformace polymeru na plynou nebo kapalnou fázi. Zpočátku pyrolýza rozkládá uretan zpět na izokyanát a polyoly, následným zvyšováním teploty dohází k štěpení uretanu na alkyly a kyselinu karbamovou. Závěrečnou kontrolovatelnou reakcí je dekarboxylace kyseliny karbamové na příslušný amin a CO₂ [14].

1.5.4.2 Zplyňování

Jedná se o exotermní reakci, při které se produkuje teplo. Organické sloučeniny se rozkládají na hořlavé plyny působením vysoké teploty v přítomnosti malých molekul (voda, složky vzduchu, apod.). Vedlejšími produkty, které vznikají při zplyňování jsou popílek a plyn. Plyn obsahuje vysoké množství výbušných molekul jako jsou H₂ a CO a dále se zpracovává v rafinerském průmyslu [14, 32]. Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma zplyňování (obrázek 13).



Obrázek 13 schéma zplyňování [14]

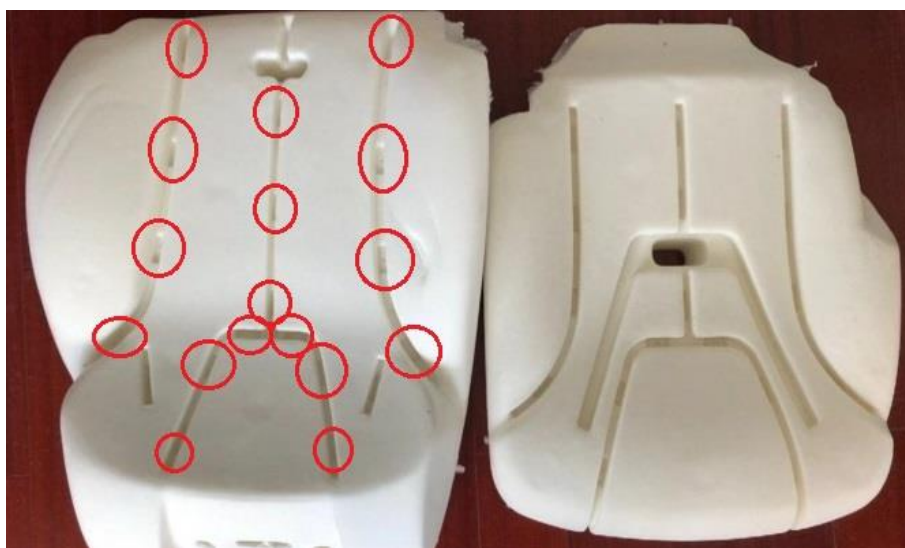
1.5.4.3 Hydrogenace

Jedná se o kombinaci výše dvou zmíněných recyklačních postupů. Působením vysokých teplot a vysokotlakého vodíku lze získat plynné a kapalné produkty. Ty lze využít jako palivo nebo jako chemikálie pro další zpracování [14].

1.6 Recyklace automobilových pěn

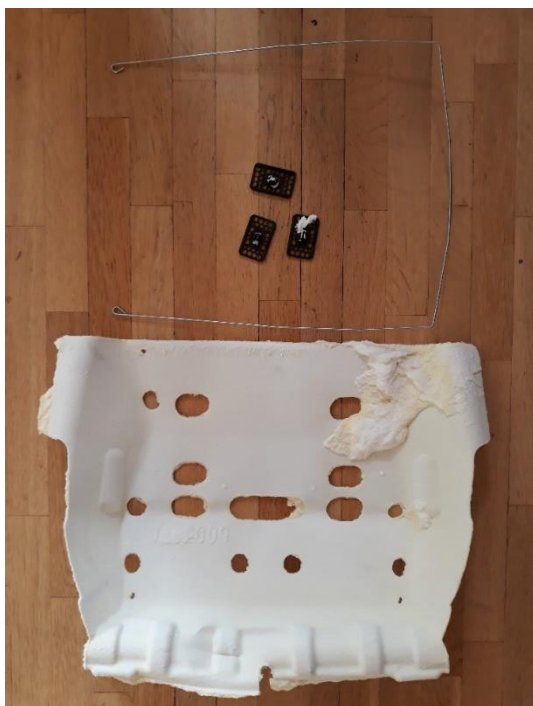
Automobilové pěny, které se používají v sedačkách, obsahují nemalé množství dalších komponentů, kterým se všeobecně říká *insert*. Tyto inserty plní různé funkce, například stabilizují potah, vypínají potah a udržují ho na požadovaném místě. Dále se mezi inserty počítají například i rámy, které drží celou pěnovou konstrukci pohromadě a zajišťují bezpečnost, klipy (obrázek 16), textilní výztuže (obrátek 14), výhřevy, vysoce porézny pěny apod.

Aby byla možná recyklace těchto pěn, je nutné, ještě před samotnou recyklací pěnu a ostatní komponenty separovat. U některých komponentů by šlo o velice zdoluhavý proces, protože je jich na jedné pěně obsaženo velké množství nebo jsou zapněny již ve výrobě. Sem patří například rámy nebo vpichovaná textilie na B-straně produktu. Tyto inserty znemožňují jakoukoliv recyklaci a je nutné je odstranit například odřezáním. Na následujícím obrázku je zobrazen sedák z PU pěny, který obsahuje inserty (Obr.14).



Obrázek 14 Pěny s přípravou pro zavedení insertu (červeně označená pole) [21]

Po odstranění insertů zbyde jen samostatná PU pěna, na kterou lze aplikovat výše zmíněné recyklační postupy. Při recyklaci PU pěn je nutné znát vstupní komponent a jeho čistotu. Pokud by recyklovaná pěna obsahovala znečištění látkami na bázi silikonů, olejů nebo laktátů (znečištění politím), je možné, že by to celý proces zpomalilo, jelikož tyto chemikálie kompletně narušují vypěňovací proces. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny detaily insertů v PU automobilovém sedáku (obrázky 15 – 18).



Obr. 15 detail insertu v PU pěně



Obr. 16. detail insertu v PU pěně



Obr. 17. detail insertu v PU pěně



Obr. 18. detail insertu v PU pěně

1.7 Automatizovaná výroba PU pěny

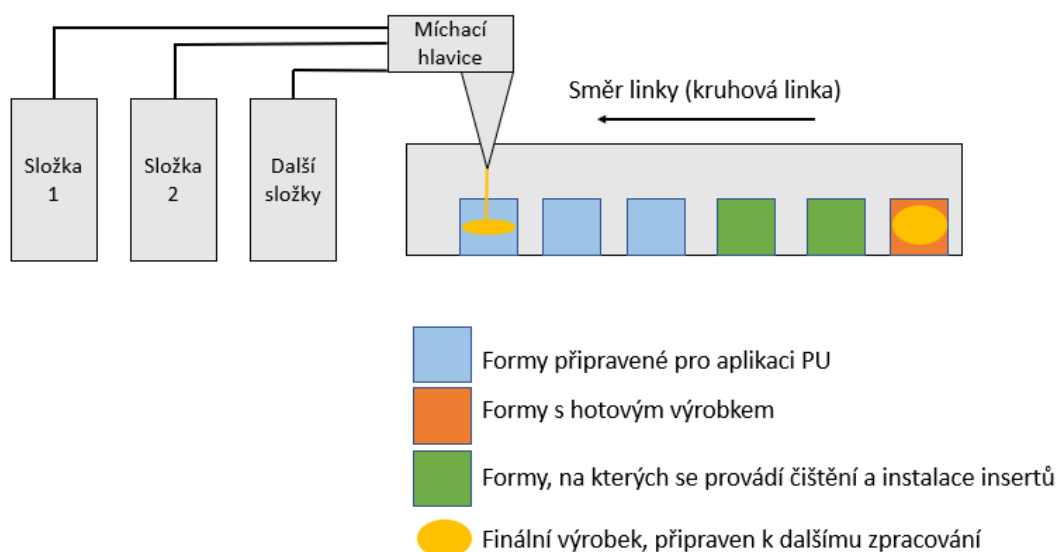
Následující kapitola popisuje automatizovanou linku pro výrobu PU pěn pro sedačky v automobilovém průmyslu. Linka firmy Proseat byla navštívena autorem diplomové práce 25.7.2017. Odborná prezentace linky byla pod vedením Ing. Petra Jandy. Důvodem uvedení popisu linky je, že zařízení je navrhováno tak, aby bylo zařaditelné do podobného systému, a proto je nutné její plný popis a identifikace místa, kam lze recyklát dávkovat (forma, tryska, potrubí, zubové čerpadlo apod.). Z důvodů utajení, zde nejsou uvedena přesná označení použitých nízkomolekulárních sloučenin, jejich poměry při výrobě a ani případná aditiva.

Firma Proseat se výrobě sedaček z PU věnuje již od 60. let 20. století a jsou jednou z předních firem v této oblasti v Evropě [5].

Výroba je kontinuální a skládá se z několika postupů, které se mohou pro různé výrobky nepatrně lišit.

1. Příprava polymerního roztoku
2. Aplikace polymerního roztoku
3. Uzavření formy a polymerní reakce
4. Otevření formy a relaxace materiálu
5. Vyndání a kontrola výrobku
6. Vyčištění formy a aplikace separátoru, popřípadě kovových částí
7. Úprava finálního výrobku a balení [16]

Na dalším obrázku je schematicky zobrazená linka pro výrobu PU pěn (obrázek 19).



Obr. 19. schematicky zobrazení linka pro výrobu PU dílů

Při výrobě je nutné prvně připravit polyolovou směs. Do této směsi se následně přidá di-isokyanát (vypěňovadlo). Veškeré složky lze připravovat v různých poměrech, dle jejich finálního použití. Poměrem složek lze řídit například tvrdost výsledné pěny. Připravený roztok je dále pomocí potrubí veden až k automatickým robotům, kteří jsou naprogramováni k přesnému dávkování roztoku do připravených, vodou vyhřívaných forem. Polymerní roztok nesmí být tuhý, aby se dostal do veškerých částí formy. Kde to není možné, mohou být umístěny trysky, které vytvoří podtlak a polymerní roztok k sobě natáhnou. Po aplikaci polymerního roztoku se forma uzavře. Ve formě dojde k chemické reakci. Ta trvá cca 420-480 vteřin. Poté je forma otevřena a výrobek je z ní pracovníkem vyndán.

V dalším kroku je nutné výrobek stabilizovat. To se realizuje dvěma způsoby:

1. Vakuum – hotový výrobek je pomocí dopravníkových pásů umístěn do přístroje, který vytvoří vakuum. Tato stabilizace je méně účinná a není kontinuální. Provádí se u dílů, které obsahují kovové či plastové části – například pěny pro zadní autosedačky.

2. Skupinou mačkáčích válců – stejně jako u vakua, je hotový výrobek pomocí dopravníkových válců posouván do soustavy válců. Prostor mezi válci a dopravníkovým válcem se neustále zmenšuje až na předem stanovenou hodnotu. Tato stabilizace je kontinuální a více účinná, ale nelze použít na díly, které obsahují pevné zapěněné části.

Finální výrobek je umístěn do skladu, kde „zraje“ přibližně 24 hodin. Následně je výrobek balen a připraven na expedici.

V určitých intervalech dochází také ke kontrole kvality v laboratoři, která obsahuje veškeré náležité vybavení (pokud je to nutné, zadává se vyhotovení určitých analýz externě – např. zkoušky hoření). Výsledky z analýz jsou zpracovávány vědeckými pracovníky a jsou porovnávány s normami a požadavky zákazníka [16].

2. PRAKTICKÁ ČÁST

K recyklaci PU pěny může dojít z několika důvodů, např. z důvodu autonehody, kdy je vozidlo již nepojízdné, výrobou zmetku, poškození v důsledku používání – prosednutí, roztržení, poleptání, propálení apod. Ve všech případech by byl vstupní materiál jiný. Zatímco u recyklace zmetku by byla PU pěna nová, po autonehodě může dojít k recyklaci i pěny, jejíž stáří může i několik desítek let. Pro praktickou část byla vybrána pěna, která byla rok používána v automobilu a pak byla odinstalována z důvodu dalšího testování. Úplně nové pěny, které by šlo označit za zmetek bohužel nebyly k dispozici.

Pro účely diplomové práce byla zvolena jako nejvhodnější postup pro recyklaci PU mechanická recyklace především z důvodu jednoduchosti sestavení recyklačního zařízení, rychlosti provedení samotné recyklace a finančních nákladů. Ke zvolení nejlepšího postupu, jak pěnu mechanicky recyklovat, bylo otestováno několik různých nástrojů a byla sledována intenzita působení na PU pěnu zejména s ohledem na velikost částic a distribuci velikosti vzniklých částic. Hodnocení nástroje probíhalo dle několika kritérií, rychlost recyklace, homogenita druhotné suroviny, jednoduchost a možná další aplikace.

2.1 Výběr a ověření pracovních nástrojů

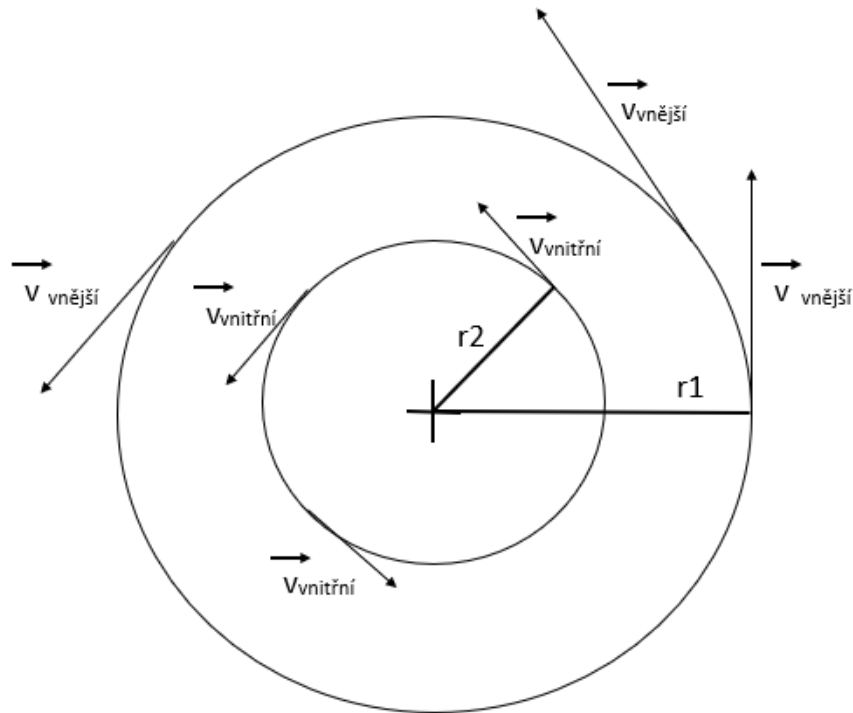
K recyklaci PU pěny bylo sestrojeno a porovnáváno několik různých nástrojů, tyto nástroje byly inspirovány současnými nástroji. Každý z nich působil na pěnu v různých směrech a úhlech.

2.1.1 Nástroje s rotačním pohybem

Testovány byly 2 nástroje, které působil na pěnu rotačním pohybem. Oba však byly diametrálně odlišné. Vlivem úhlové rychlosti vznikal problém, že rychlost působícího nástroje nebyla v každém bodě stejná a s rostoucí vzdáleností od vřetene rostla. To mohlo způsobovat heterogenitu ve výsledném vzorku. Následující rovnice byla využita pro výpočet úhlové rychlosti u nástrojů s rotačním pohybem (rovnice 7).

$$v = \omega * r = 2\pi f * r \quad (7)$$

Na následujícím obrázku je zobrazen rozbor sil bodu pohybujícího se po kružnici (Obrázek 20).



Obr. 20. schématické zobrazení pohybu hmotného bodu po kružnici [30]

2.1.1.1 Drátěný kotouč

První recyklační nástroj působil na pěnu rotačním pohybem. Použitý drátěný kotouč se používá na broušení tvrdých povrchů. Byl opatřen ocelovými dráty o průměru 2 mm a délkou 25 – 30 mm. Tento nástavec byl poháněn jednoduchým vrtacím šroubovákem s rychlostí 700 min^{-1} .

Na následujícím obrázku je zobrazen vrtací šroubovák Black&Decker MT350K, opatřený drátěným kotoučem (Obr. 21).



Obrázek 21 vrtací šroubovák s drátěným kotoučem

Výpočet vnitřní a vnější obvodové rychlosti $d_{\text{vnitřní}}=75$ mm, $d_{\text{vnější}}=100$ mm, $f=11,67$ Hz. V tabulce 4 jsou zobrazeny výsledné úhlové rychlosti drátěného kotouče.

Tabulka 4 Vypočítané hodnoty úhlové rychlosti drátěného kotouče

Úhlová rychlost (m/s)	Drátěný kotouč
Vnitřní	2,75
Vnější	3,67

Na následujícím obrázku je zobrazen výsledek působení vrtacího šroubováku s drátěným kotoučem na vzorek PU pěny (Obr.22).



Obrázek 22 Výsledek mechanické recyklace pomocí drátěného kotouče

2.1.1.2 Lamelový brusný kotouč

Jako druhý recyklační nástroj byly využity lamelové brusné kotouče a různých zrnitostech, které byly připevněny k úhlové brusce. Jako nejlepší a použitý k recyklaci, byl vyhodnocen brusný kotouč o zrnitosti 40. Úhlová bruska dosahovala rychlosti 10 000 min^{-1} . Na následujícím obrázku je zobrazena úhlová bruska i s kusem recyklované PU pěny (Obr. 23). Brusný kotouč obsahoval celkem 72 lamel, výrobce LUX tools. Použitá úhlová bruska byla od firmy Black&Decker typ KG725.

Výpočet vnitřní a vnější obvodové rychlosti $d_{\text{vnitřní}}=70 \text{ mm}$, $d_{\text{vnější}}=120 \text{ mm}$, $f=50 \text{ Hz}$ (dle popisu na návodu). V tabulce 5 jsou popsány úhlové rychlosti lamelového kotouče.

Tabulka 5 Vypočítané hodnoty úhlové rychlosti lamelového kotouče

Úhlová rychlost (m/s)	Brusný lamelový kotouč
Vnitřní	11,9
Vnější	18,85

U úhlové brusky je rozdíl mezi úhlovou rychlostí vnitřního a vnějšího bodu natolik markantní, že je možné narušení celkové homogenity recyklátu.



Obrázek 23 Úhlová bruska

2.1.2 Nástroj s přímočarým pohybem

Dalším postupem pro testování recyklace byl pracovní nástroj s přímočarým pohybem. Zde byl vyzkoušen jeden přístroj (pásová bruska) s různými zrnitostmi brusného tělesa.

2.1.2.1 Brusný pás

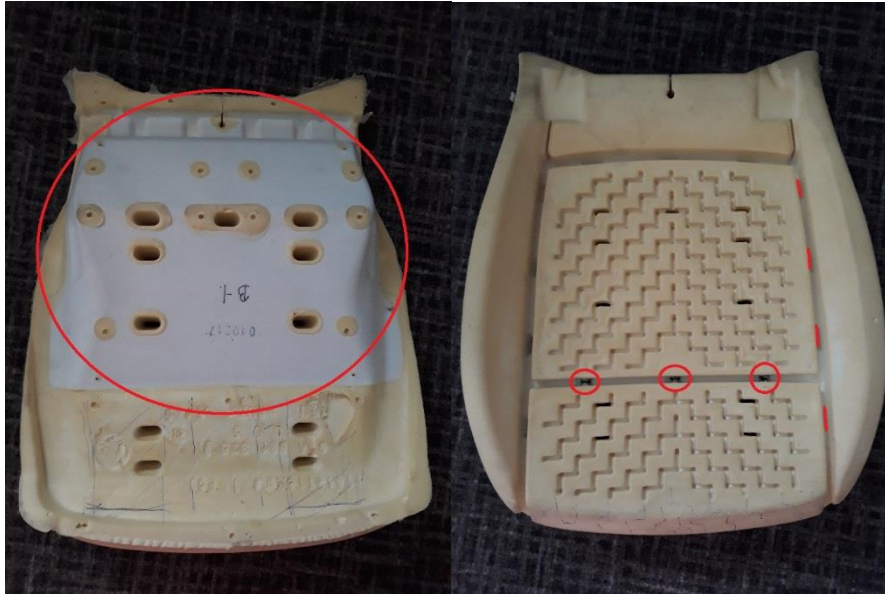
Posledním otestovaný nástrojem, byl brusný pás s různými stupni zrnitosti zrna. Zde se opět potvrdila jako nejlepší, hrubost zrna 40, která byla použita při výrobě recyklačního zařízení. **Rychlost brusného pásu byla 7 m/s.** Na následujícím obrázku je zobrazena pásová bruska, která byla použita k pohonu brusného pásu. (Obr.24).



Obrázek 24 pásová bruska

2.2 Zkušební vzorek

Jako zkušební vzorek, byl zvolen PU sedák ze sériově se vyrábějícího auta. Tento sedák byl zabudován v sedačce a přikryt potahem, a to cca 1 rok. Toto z něj činilo vhodného kandidáta pro zkoušky. V sedáku byly také obsaženy inserty, které bylo nutné před samotnou recyklací demontovat. Samotná demontáž insertů trvala 2:32 minuty, a to nezkušené osobě bez standardizovaného nářadí. Zbylé části z demontáže a inserty jsou ukázány níže. Na následujícím obrázku je zobrazen testovací vzorek, který byl opatřen inserty (Obr. 25).



Obrázek 25 Kontrolní vzorek PU s inserty

2.2.1 Zkušební vzorek – testování vybraných nástrojů

Po demontáži insertů byl vzorek připraven k recyklaci. Na něm byly vyzkoušeny zjednodušené postupy navrhované recyklace, a to pomocí výše popsaných nástrojů. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny kusy PU pěny, na které byly aplikovány zkušební nástroje (Obr. 26). Celkový postup pro všechny výše zmíněné nástroje probíhal stejně. Vzorek PU pěny byl ručně fixován a poté na něj působilo recyklační těleso nástroje. V momentě, kdy došlo k dotyku nástroje a PU pěny, byla spuštěna časomíra, což byl jeden z hlavních parametrů, u kterého muselo dojít ke zlepšení při konstrukci zařízení. Po kompletní recyklaci vzorku PU pěny byla časomíra pozastavena a čas zapsán.

Velikost částic byla stanovena pomocí obrazové analýzy ImageJ. Částice byly nasnímány pomocí makroskopu Levenhuk DTX90 spolu s měřítkem. Po nakalibrování obrazu bylo na jednotlivých snímcích změřeno 100 částic. Jednotlivá měření byla statisticky zpracována. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6. Na následujícím obrázku je zobrazen mikroskop Levenhuk DTX90 (obrázek 26).



Obrázek 26 Makroskop Levenhuk DTX90 [33]

Prvním testovaným přístrojem byl vrtací šroubovák s drátěným kotoučem, který úspěšně dokázal recyklovat pěnu, avšak za velice neergonomických podmínek (drátěný kotouč se spíše do PU pěny zasekával, než ji brousil, a tak stabilizace a samotná recyklace byla velmi obtížná). Díky příliš velké délce ocelových drátů na nástavci se občas stávalo, že z pěny byly utrženy i větší kusy PU pěny. Recyklovaný materiál byl fixován ručně.

Rychlost celého procesu byla nízká. Nejobtížnější však bylo zkušební vzorek udržet, aby se PU pěna hned na začátku jen nezasekla do drátěného kotouče. S tímto nástavcem byla provedena zkouška recyklace, přesně naměřeného vzorku. Kompletní recyklace trvala 32:17 minut. Recyklovaný materiál měl rozměry od $D=1-8$ mm, byly ale obsaženy i větší kusy, které dosahovaly velikost až $D=10$ mm, což je vhodná velikost na přesun materiálu pomocí podtlaku a zároveň je díky této velikosti dobré se domnívat, že neovlivní výsledný komfort sedačky, do které by byly implementovány. Navíc má takto malý materiál i jiné možnosti v dalším užití. Následně byl experiment proveden i na zmrazeném vzorku (24 hod. při $t = -18$ °C), ovšem výsledky byly podobné.



Obrázek 27 kontrolní vzorky pro testování zkušebních nástrojů

Dalším přístrojem, který byl vyzkoušen na zkušebním vzorku, byla úhlová bruska s brusným kotoučem o různých hrubostech zrna. Jako nejlepší hrubost zrna, se ukázal brusný kotouč s hrubostí 40. Takto hrubý kotouč pěnu nepálil a zároveň ji drolil na podobně veliké částice. Tyto částice měly rozměry od $D=0,5 - 1$ mm. Recyklace úhlovou bruskou byla také několikrát rychlejší, než pomocí vrtacího šroubováku. Předdefinovaný vzorek, byl celý zrecyklován za 10:35 minut. To je přibližně 3x kratší čas než u vrtacího šroubováku. Přidržování vzorku při recyklaci bylo méně náročné, než tomu bylo u drátěného kotouče.

Posledním testovaným přístrojem byla elektrická bruska. S tímto přístrojem měl autor velice podobné výsledky jako s úhlovou bruskou. Menší rychlost pásové brusky oproti brusce úhlové byla vykompenzována kontaktní plochou, která byla přibližně 3x-4x větší. Pás brusky také působil na testovaný vzorek stejnou rychlostí, což zajišťovalo homogenní recyklát. Z těchto důvodů byl k modifikaci použit princip pásové brusky. Na následujícím obrázku je zobrazen výsledek působení lamelového brusného kotouče a a brusného pásu na vzorek PU pěny (Obr. 28).



Obrázek 28 výsledek mechanické recyklace lamelového brusného kotouče a brusného pásu

Cílem konstruovaného zařízení bylo tuto rychlost a kvalitu překonat a celý proces automatizovat. – *výsledky v kapitole 3.1 Ověření zařízení.*

2.3 Návrh a vývoj zařízení

Přístroj, který nejlépe vyhovoval požadavkům, byl modifikován a vyzkoušen na reálném vzorku PU pěny. K těmto požadavkům například patřilo, rychlé a stabilní recyklování PU pěny, odvádění recyklátu za pomoci odsávání, životnost a snadná údržba. Návrh zařízení se skládal z těchto částí:

1. Podávací válec

Podávací válec byl sestaven za účelem přesného přivádění PU pěny k brusnému komponentu. Celý mechanismus se skládal z drsného válce, který kontrolovaně podával pěnu. Zdrsnění na válci pomáhalo k pevnému držení pěny, která se pod vlivem brusného komponentu deformovala, proto bylo nutné, aby tento mechanismus byl co nejbližší brusnému komponentu. Další částí byla nakloněná rovina, po které PU pěna klouzala k ozubenému válci.

2. Pracovní nástroj

Brusný komponent byl převzat z již funkčních a odzkoušených nástrojů. Jednalo se o brusný papír se zrnitostí 40, který se po odzkoušení jevil jako nejvhodnější. Tím byla zajištěna případná oprava stroje či výměny brusného komponentu.

Brusný papír působil na pěnu v celé své ploše. A zároveň odváděl recyklovanou pěnu k potrubnímu systému. Pohon bylo možné převzít z pásové brusky, který se osvědčil při pokusném recyklování.

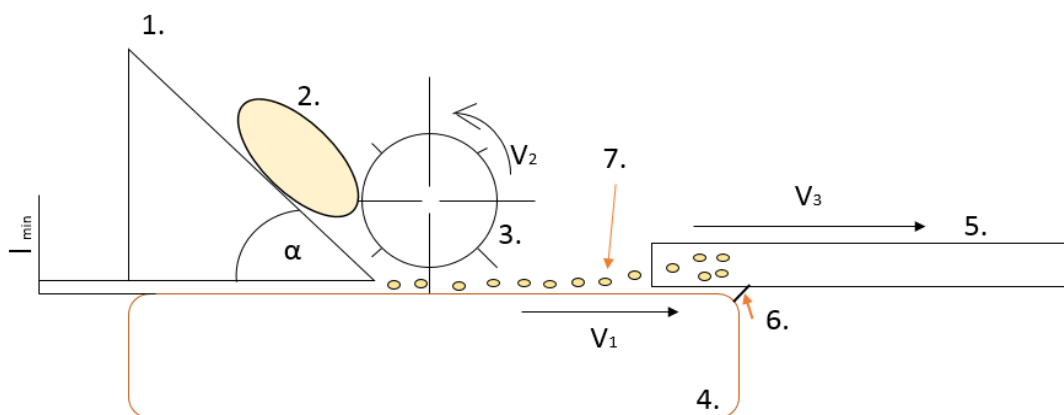
3. Systém odsávání

Byl zhotoven z PVC trubek a sloužil k přemístění zpracovaného materiálu k dalším výrobním procesům. Materiál byl v potrubí hnán pod tlakem. K vytvoření podtlaku byl využit vysavač se soustavou filtrů a ventilů. Zpětným chodem vysavače by bylo možno dodávat recyklovaný materiál k lince.

4. Stěrka

Byla navržena za účelem čištění brusného pásu a zadržení případných odletujících částic recyklátu. Otvor pro systém odsávání končil na úrovni této stěrky, aby mohly být případné částice odsány.

Při návrhu na vývoje nástroje byl brán zřetel zejména na jeho nastavitelnost, aby autor mohl vyzkoušet různé podmínky recyklace. Týkalo se to ozubeného válce, rychlosti brusného pásu, náklonu roviny a rychlosti odsávání. Na následujícím obrázku je zobrazen návrh recyklačního nástroje (Obr. 29).

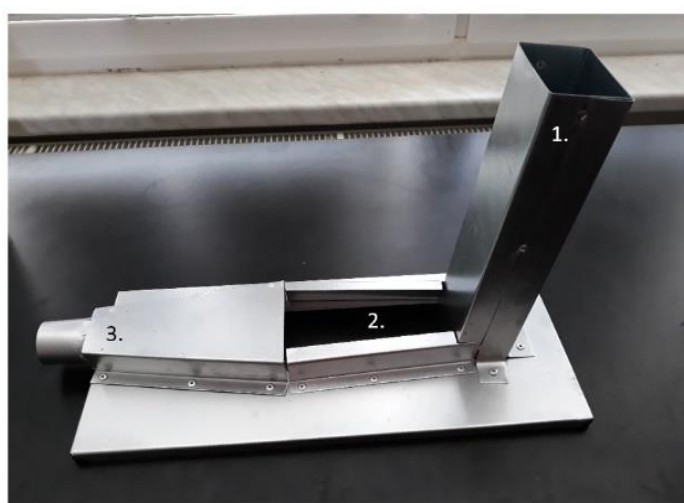


1. Nakloněná rovina (dodávání PU pěny)
2. PU pěna
3. Ozubená válec (k přesnému dodávání PU pěny k brusnému pásu)
4. Brusný pás
5. Systém odsávání
6. Hřeben
7. Části recyklované PU pěny

Obrázek 29 návrh na konstrukci recyklačního nástroje

2.3.1 Realizace zařízení

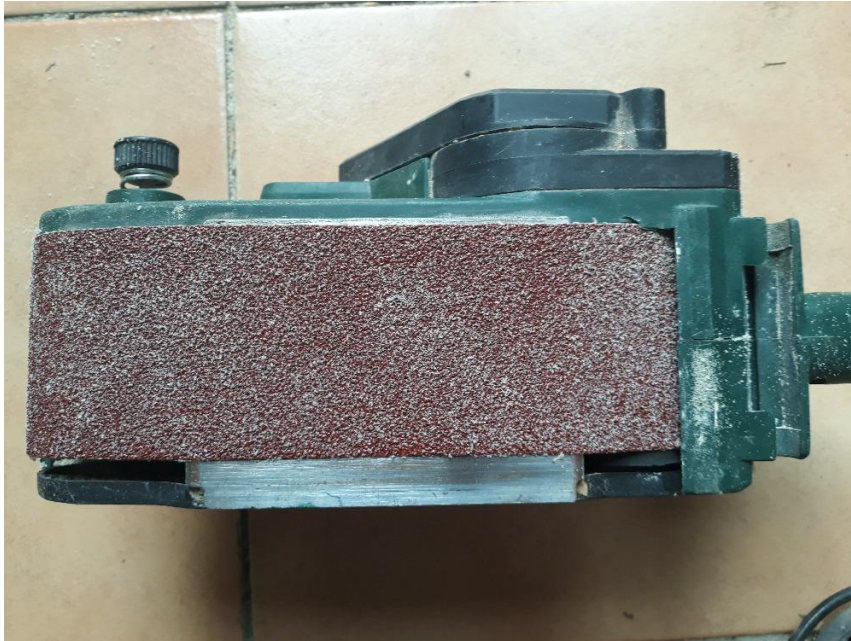
Nejprve byla vytvořena vrchní deska přístroje, která se skládala z nakloněné roviny a odsávacího systému. V místě, kde docházelo k recyklaci PU pěny bylo instalováno plexisklo, aby bylo možné celý proces sledovat. Vrchní deska byla vyrobena z pozinkovaného plechu, který byl spojován pomocí nýtů a svarů. Na desku byl připevněn i hřeben, a to pomocí lepidla. Ten umožňoval čištění brusného pásu a zadržoval recyklované částice ve funkční zóně odsávacího systému. Na následujícím obrázku je zobrazena vrchní deska recyklačního nástroje (Obr. 30)



1. Nakloněná rovina
2. Plexisklo – funkční místo stroje
3. Odsávací systém

Obrázek 30 Vrchní deska recyklačního zařízení

Spínač brusky byl trvale zablokován v poloze zapnuto a elektrický přívod byl doplněn o další spínač, protože po zakrytí celé pásové brusky nebyl k vypínači a pojistce přístup. Dále byla modifikována její vnější konstrukce, pomocí které mohla být pásová bruska připevněna k boxu a zajišťovala její stabilní polohu při recyklaci. Na dalším obrázku je zobrazena pásová bruska s brusným pásem o zrnitosti 40 (obrázek 31).



Obr. 31. pásová bruska s brusným pásem o zrnitosti 40

Jako podávací válec byla použita plastová trubka. Tato trubka měla průměr 50 mm v průměru a délku 40 mm. Její povrch byl zdrsňen, aby po PU pěně neklouzala. Poháněn byl manuálně (Obr. 32).



Obrázek 32 podávací válec

Následně byl vyroben box z dřevotřísky o rozměrech 440x190x180 (*délka x hloubka x výška*), který je nosnou konstrukcí celého zařízení. To zaručí snadnou manipulaci, bezpečnost, krytí před případnými odletujícími částmi a zlepšení celkové účinnosti odsávacího systému. Svrchní deska byla po instalaci zařízení a jeho zapojení do obvodu připevněna k boxu, do kterého byla umístěna modifikovaná pásová bruska. Na následujícím obrázku je zobrazen přístroj před finální kompletací (Obr. 33-34).



Obrázek 33 stroj před finální kompletací



Obrázek 34 stroj před finální kompletací – iso pohled

K odsávacímu systému byla napojena hubice od vysavače Kärcher WD3. Ta odváděla recyklovaný materiál pryč ze stroje. Na následujícím obrázku je zobrazen kompletní recyklační přístroj (Obr. 35).



Obrázek 35 recyklační nástroj v chodu

2.4 Návrhy propojení zařízení s linkou

K propojení stroje s linkou a k dodání recyklované pěny do nově vyráběné, jsou navrhnuty tyto postupy.

Přidávání recyklátu do formy

Na přesun PU drti by byl použit ventilátor, který by podtlakem unášel drť trubkami až do samotné formy. Tato forma by byla otevíratelná a zároveň vzduchově uzavíratelná. K nanesení potřebného množství nové PU pěny by byla nutná modifikace forem a samotného zařízení pro nanášení pěny. Pomocí již implementovaných trysek, se ve formě vytvoří podtlak, který v jeden moment vtáhne do formy novou a již recyklovanou PU pěnu. Následně by se oba přístroje odpojily a proces by pokračoval již standartním postupem popsaným v kapitole 3. U tohoto postupu by mohl nastat problém se shodností vyrobených výrobků. Kvůli nemožnosti kontrolovat usazení recyklované pěny.

Přidávání recyklátu do potrubního systému

Při mísení jednotlivých složek v potrubním systému, ještě před aplikací PU pěny do formy. Tento postup má určité výhody, a to zejména v shodnosti výrobků při jejich výrobě. Nebyla by nutná úprava forem, jelikož by k samotné přípravě materiálu docházelo už v potrubním systému. Problém by v tomto postupu mohl nastat při dodávání recyklátu

k chemikáliím. Jelikož by byl recyklát veden pomocí vzduch, mohlo by nastat vypěňování již ve vstříkovací hubici a tím by byl celý systém znehodnocen.

Mísení recyklátu s jednou z chemických komponent

Mísení recyklátu s jednou z chemických komponent ještě před jejich mísením v potrubním systému. Tyto chemikálie jsou drženy ve velkých nádobách, které se musí doplňovat. Nebyl by tedy problém s přidáním recyklátu do nádob. Problém by mohl nastat v zanášení potrubního systému nebo nechtěnou reakcí recyklátu s chemikálií.

Přidávání recyklátu na B-stranu nové pěny

Aplikace recyklátu na B-stranu již vypěňující PU pěny. Při takové to aplikaci, by nebyla vizuálně poškozena A-strana (komfortní a vzhledová), což by mělo při výstupní kontrole své výhody. Pro tuto aplikaci by musely být vyvinuty nové formy umožňující aplikování recyklátu na B-stranu. Také by zde hrozilo nebezpečí zastavení celé vypěňující reakce v nové PU pění [16].

Aplikace recyklátu pomocí speciální směšovací hlavy

Tato míchací hlava již existuje a z praxe je ověřené, že by byla schopna dodávat recyklovaný materiál k nově vznikající PU pění. Bohužel vyzkoušet si tento postup nebylo možné z důvodu výskytu této hlavice v Belgii [16].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Vyrobené zařízení bylo nutné otestovat a porovnat s nástroji, ze kterých vycházel. Dále byl otestován výsledný recyklát z recyklačního nástroje.

3.1 Ověření zařízení

K testování recyklačního nástroje byla použita stejná PU pěna, která byla použita i při hledání optimálního nástroje pro modifikaci. Hlavním kritériem pro testování byla homogenita recyklátu a rychlost jeho zpracování. V tabulce 6 jsou popsány výsledky zkoušených nástrojů a vyrobeného recyklačního přístroje.

Recyklát získaný z postaveného přístroje byl **stejný** jako recyklát, který byl získán z pásové brusky. Postup měření je popsán v kapitole 2.2.1 *Zkušební vzorek - testování zkušebních nástrojů* Výsledky z měření jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Velikost částic – výsledky měření

Jednotky (mm)	Drátěný kotouč	Brusný lamelový kotouč	Pásová bruska	Recyklační zařízení
Průměr	3,66	1,1	1,24	1,15
Rozptyl	11,65	0,32	0,57	0,49
Odchylka	3,41	0,57	0,76	0,7
95% IS	1,57<3,69<5,8	0,75<1,1<1,45	0,76<1,24<1,7	0,71<1,15<1,58

V tabulce 6 jsou u drátěného kotouče pozorovatelné velké rozdílové hodnoty mezi spodní a horní hranici 95 % intervalu spolehlivosti. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.1.1 *Drátěný kotouč*, při této recyklaci se z testovaného vzorku PU pěny uvolňovaly větší kusy.

Mezi výslednými hodnotami recyklačního zařízení a ostatních strojů byla pomocí rovnice (7) spočítána statistická významnost. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.

Určení statistické významnosti pomocí statistického nástroje ANOVA bylo realizováno v programu Microsoft Excel. Hladina významnosti byla zvolena $p=0,05$ [34].

$$F = \frac{n_1(n_2-1) \cdot s^2}{n_2(n_1-1) \cdot s^2} \quad (7)$$

Kde $n_{1,2}$ je počet provedených zkoušek, s^2 je rozptyl

Tabulka 7 Vypočítané hodnoty statistické významnosti – homogenita

Statistická významnost	Rec. zařízení/drátěný kotouč	Rec. zařízení/lamelový kotouč	Rec. zařízení/pásová bruska
Hod. test. kritéria (F)	565,27	2,34	1,35
Kritická hodnota	1,49	1,49	1,49
Výsledek	Statisticky významné	Statisticky významné	Statisticky nevýznamné

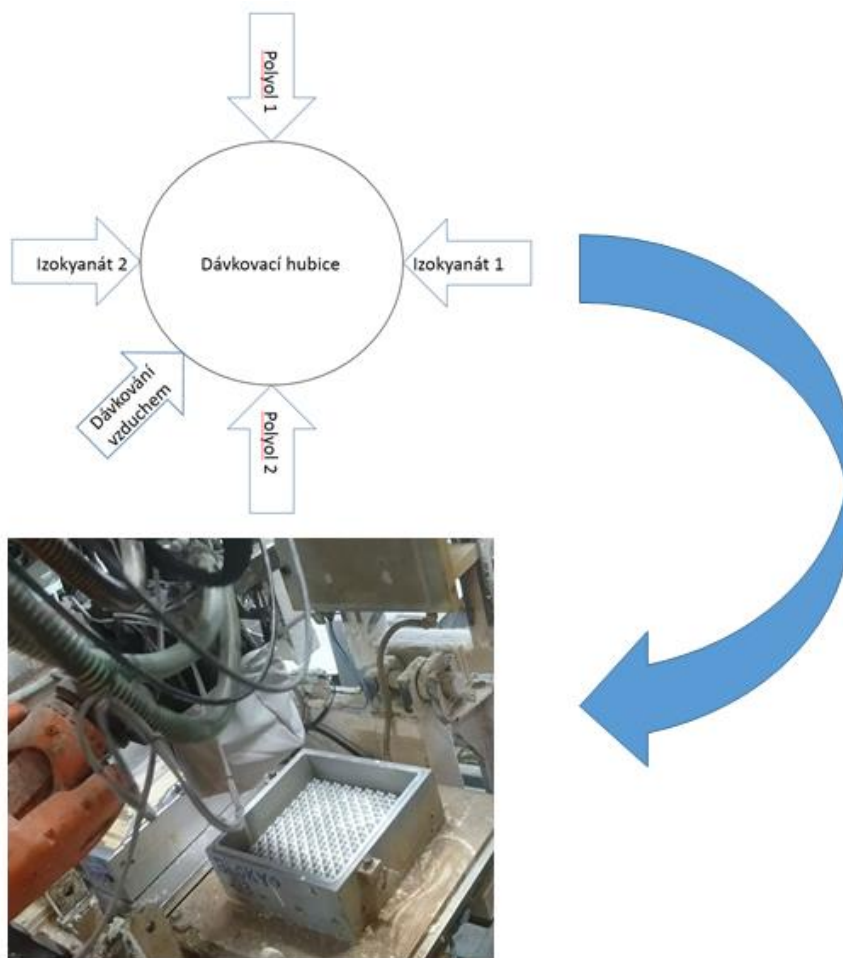
Z tabulky je zřejmé, že homogenita recyklátu u recyklačního zařízení, se oproti drátěnému kotouči výrazně zlepšila. Mezi pásovou brusku a recyklačním zařízením není v homogenitě částic statisticky významný rozdíl. Avšak v případě porovnání recyklačního zařízení s lamelovým kotoučem a zejména drátěným kotoučem, jsou tyto vlivy již statisticky významné. Nicméně hodnotící kritéria v případě lamelového kotouče a pásové brusky se liší pouze v desetínách milimetru. To na výsledný produkt a přepravu recyklátu nemá vliv.

V tabulce 8 jsou zobrazeny výsledné časy recyklace PU pěnového vzorku

Tabulka 8 Výsledné časy recyklací

Čas	Drátěný kotouč	Brusný lamelový kotouč	Pásová bruska	Recyklační zařízení
mm:ss	32:17	10:35	7:49	6:38

Zrychlení celého procesu o cca 1 minutu bylo dosaženo kontinuální prací přístroje. Navíc díky odsávacímu systému byl recyklát odveden do připravených nádob. Po konzultaci s Ing. Jandou z firmy Proseat, by mohl být recyklát dodáván do forem pomocí speciální hubice, která navíc obsahuje jedno přívodní potrubí, kde je materiál hnán vzduchem. Na obrázku 36 je schematicky popsána speciální dávkovací hubice.



Obrázek 36 Schéma a obrázek speciální hubice [16]

3.2 Výroba vzorků s recyklovanou PU pěnou

Recyklovaný materiál byl odzkoušen pro výrobu nové PU pěny. Toto testování proběhlo ve firmě Proseat, a to přímo na výrobní lince.

Na výrobní linku byly nainstalovány speciální formy, do kterých byl umístěn recyklát. Tento recyklát se musel ochránit před tzv. saharou, která vyfukuje přebytečně nečistoty z formy. Poté byl do formy aplikován roztok PU pěny a forma byla zavřena. Za určitou dobu byl z formy vytažen kvádr PU pěny, která obsahovala určité množství recyklátu. Z důvodu absence speciální hubice pro aplikaci odlišných materiálů do formy byl recyklát do formy aplikován ručně, a to ještě před samotnou aplikací nového roztoku PU. Na obrázku 37 je zobrazena forma s Z-strukturou, velikost formy je 400x400x100 mm.



Obrázek 37 forma s Z-strukturou

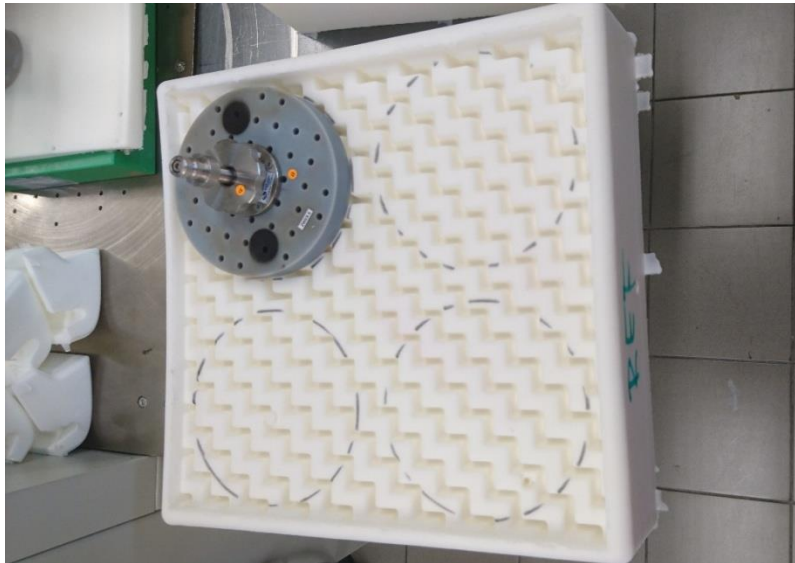
Dohromady byly vyrobeny 4 kvádry. Bez recyklátu, který sloužil k porovnání naměřených dat, s 1 % recyklátu (9,5 gramu) s 5 % recyklátu (47,5 gramu) a s 10 % recyklátu (95 gramů). Další výroby nebyly možné s důvodu nedostatku recyklátu. Hotový vzorek vážil 950 g.

K výrobě zkušebních bloků musela být zvolena tzv. Z-struktura, a to z důvodu vypěňování. Při použití hladkých forem se recyklát dostal na její dno a to zamezilo jakémukoliv dalšímu vypěňování. Na obrázku 38 je vyobrazeno nanášení nového roztoku PU pěny na recyklovaný vzorek.



Obrázek 38 Aplikace nové PU pěny do formy, která obsahuje recyklát

Aplikace recyklátu byla provedena manuálně. Referenční vzorek byl vyroben bez jakýchkoliv vad. Na následujícím obrázku je zobrazen referenční vzorek, který byl vyroben bez větších nebo viditelných vad (Obr. 39).



Obrázek 39 referenční vzorek

U 1 % obsahu recyklátu už byly znatelné nedokonalosti, kde se recyklát dostal na dno formy a zamezoval tak vypěňování. Tím vznikaly ve struktuře velké otvory. Následující obrázek zobrazuje vyrobený vzorek s obsahem recyklátu 1 % (Obr. 40).



Obrázek 40 vyrobený vzorek s 1% recyklované PU pěny

5% vzorek už má znatelně více míst, kde nedocházelo k dokonalému vypěňování nové PU pěny (Obr. 41).



Obrázek 41 vzorek s 5% recyklované PU pěny

10% vzorek obsahoval velké množství nedokonalostí a děr (Obr. 42).



Obrázek 42 vzorek s 10% recyklované PU pěny

Na dalším obrázku je zobrazen detail, kdy recyklát narušuje růstovou reakci nové PU pěny (obrázek 43).



Obr. 43. Detail narušení růstové reakce PU pěny

3.3 Stanovení tvrdosti

K porovnání vlastností vyrobené pěny obsahující recyklát s pěnou bez recyklátu byly použity následující testovací metody: test tvrdosti a stanovení hystereze. Ostatní testovací metody nebylo možné provést z důvodu nevhodnosti finálních vzorků na jejich testování nebo z časových důvodů (dlouhodobé testy). Test tvrdosti byl proveden v laboratořích fy Proseat a to standardním postupem dle normy DIN 53579 [16].

3.3.1 Použité zařízení a postup zkoušky

K testování byl použit přístroj firmy Zwick, interně značený jako ZWICK 1. Vzorek byl vložen do přístroje a standardním postupem otestován dle normy DIN 53579, resp. PV3410, která je podnikovou normou společnosti Volkswagen Group a z normy DIN vychází. Jedná se o nedestruktivní metodu, která se používá k určení tvrdosti pružných lisovaných pěn s minimální tloušťkou 10 mm [29]. Charakteristické hodnoty

hystereze jsou zaznamenávány v kompresním testu dle DIN 53579-1. Stlačovací deska měla průměr 200 mm, poloměr zakřivení plochy 200 mm a zaoblení hrany o poloměru 5 mm. Směr zkoušky je veden kolmo ke zkušebnímu bodu. Zatížení při zkoušce hystereze je $F = 600 \text{ N}$ při $v = 100 \text{ mm/min}$. Hodnota předpětí byla 20 N. Hystereze se odečítala při 320 N, dle normy se odečítá při poloviční síle zvětšené o předpětí. Na každém vzorku byly znázorněny 4 oblasti, v kterých se zkouška prováděla [16, 29]. Na obrázku 44 je zobrazeno zařízení ZWICK.



Obrázek 44 Servohydraulický pulsátor Zwick/Roell Amsler HC25, tah-tlak – z důvodu zákazu focení v laboratořích PROSEAT. Obrázek převzat ze stránek AV [19]

Výsledky hysterezních testů jsou zobrazeny na následující grafu (Graf 1). Tato data byla naměřena v laboratořích firmy Proseat, výstupní protokol je uveden v kapitole 6. *PŘÍLOHY.*

Tabulka 9 Porovnání hodnot hystereze u referenčního a vyrobených vzorků

Hystereze(%)	Referenční	1 % Recyklátu	5 % Recyklátu	10 % Recyklátu
1	26,14	26,58	26,78	26,72
2	26,46	26,86	27,3	26,92
3	26,15	26,94	27,3	27,01
4	26,41	27,04	27,41	26,82
Střední hodnota	26,29	26,86	27,2	26,87
Rozptyl	0,02	0,03	0,06	0,01

Určení statistické významnosti pomocí statistického nástroje ANOVA bylo realizováno v programu Microsoft Excel. Hladina významnosti byla zvolena $p=0,05$ [34].

$$F = \frac{n_1(n_2-1) \cdot s^2}{n_2(n_1-1) \cdot s^2} \quad (7)$$

Kde $n_{1,2}$ je počet provedených zkoušek, s^2 je rozptyl

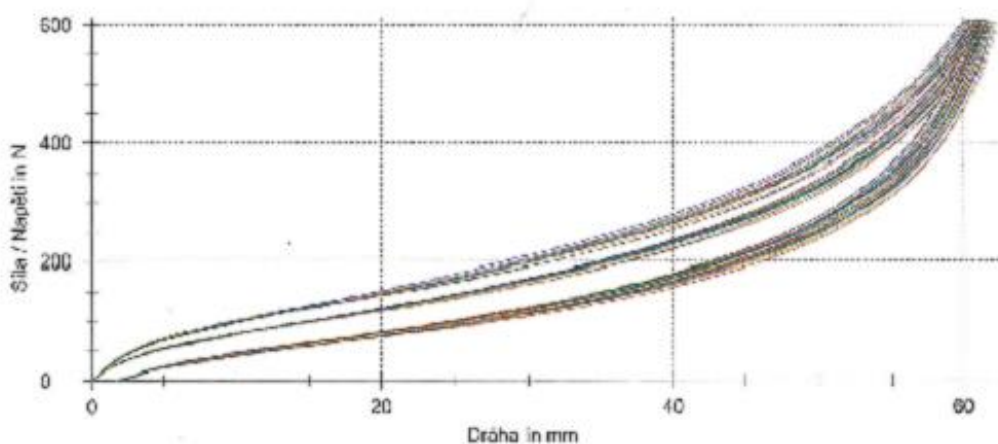
Výsledky ze statistické významnosti jsou uvedeny v tabulce 10

Tabulka 10 Porovnání hodnot statistické významnosti - hystereze

Statistická významnost	Referenční / 1 % vzorek	Referenční / 5% vzorek	Referenční / 10 % vzorek
Hod. test. kritéria (F)	2,25	9	4
Kritická hodnota	15,44	15,44	15,44
Výsledek	Statisticky nevýznamné	Statisticky nevýznamné	Statisticky nevýznamné

Mechanické vlastnosti přidaný recyklát neovlivňoval. Nicméně s přidáváním recyklátu se hystereze mírně zvětšovala. Důvod zlepšování u vzorků s 10 % může být zapříčiněn nerovnoměrnou aplikací recyklátu do formy, a tím mohlo dojít ke zkreslenému měření.

Na následujícím grafu je zobrazen průběh zkoušky tvrdosti PU pěn (Graf 1)



Graf 1 porovnání hystereze vzorků.

Z výsledných hodnot obsažených v tabulce 9 a grafu 1 je zřejmé, že recyklát ve velké míře neovlivňoval. Průběhy hysterezních křivek jsou prakticky shodné, mají podobný sklon, shodné finální hodnoty a neobsahují viditelné výkyvy.

4. DISKUZE

Doby recyklace, které byly u každého nástroje různé, můžeme přisoudit zejména k velikosti pracovní plochy, která PU pěnu oddělovala, rychlosti otáčení, či posuvu pracovního tělesa a k stabilizaci vzorku, tedy rychlosti pohybu nástroje. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.1 *Zkušební vzorek – testování vybraných nástrojů*, tak každý vzorek byl přidržován manuálně. Tato fixace byla nutná, jelikož se v této fázi jednalo pouze o ověření účinnosti nástroje, a tedy nebyl vyroben držák na fixaci PU pěny. Manuální podávání umožnilo také ovlivňovat směr a intenzitu, kterou nástroje na pěnu působily. Při recyklaci vrtacím šroubovákem s drátěným kotoučem docházelo k oddělování velkých kusů, což bylo způsobeno jednotlivými dráty, které jsou od sebe vzdáleny až 4 mm. Tyto dráty do pěny spíše pronikaly, namísto aby materiál plynule odebíraly v malých množstvích. Tento jev vyžadoval, aby se takto oddělené části znovu podrobily recyklačnímu procesu a to opakovaně. To značně prodloužilo dobu recyklace, která trvala 32 minut a 17 vteřin. Vrtací šroubovák měl ze všech zkoušených nástrojů nejmenší úhlovou rychlost. Úhlová bruska s lamelovým brusným kotoučem recyklovala lépe, avšak velikost kontaktního místa byla příliš malá na to, aby mohla být využita k průmyslové recyklaci. Nejlépe se osvědčil lamelový kotouč se zrnitostí 40. Tato zrnitost velmi dobře brousila PU pěnu a kotouč do pěny nepronikal. Vzhledem k vysokým otáčkám a průměru brusného kotouče, zde již byl znatelný fakt obvodové rychlosti, kdy vnější okraj kotouče brousil pěnu jinak než kraj vnitřní. Nejvíce vyhovujícím nástrojem byla tedy zvolena pásová bruska, jenž měla oproti úhlové brusce větší plochu kontaktního místa a oproti vrtacímu šroubováku vyvíjela větší rychlosti. Recyklování probíhalo podobně jako s lamelovým brusným kotoučem. I zde byla použita zrnitost 40, která se již dříve osvědčila. Proto byla vybrána jako vhodný nástroj k zástavbě pásová bruska.

Velikosti recyklovaných částic byly u všech zkoušených nástrojů v rozmezí desítek až jednotek milimetrů. Pouze u drátěného kotouče se objevovaly i větší, natrhané kusy PU pěny s rozměry v desítkách milimetru. Jelikož bylo zamýšleno, aby bylo recyklační zařízení použito v průmyslové aplikaci, byla velikost částic důležitým parametrem. Větší částice by mohly potrubní systém či trysku ucpávat, pro jejich přesun je nutný větší výkon a mohly by mít neblahý vliv na kvalitu konečného produktu. Vznikala by místa s lokálně významně odlišnou kvalitou.

Recyklační nástroj byl stejný jako u pásové brusky, byla použita i stejná zrnitost. Velikosti částic byly prakticky totožné s pokusem recyklace pásovou bruskou. Vylepšení přinesl stroj v možnosti automatického podávání, nízké pořizovací ceně, možnosti regulace rychlosti brusného pásu a podávacího válce a konečně zrychlením celého recyklačního procesu.

Rychlost recyklačního procesu byla oproti rychlosti výroby znatelně delší. Nicméně toto zařízení je primárně určeno k recyklaci špatných kusů z výroby, kterých vzniká relativně nízké množství – jednotky kusů za pracovní den/ 3 směny.

Výše popsané recyklační zařízení bylo navrhováno tak, aby bylo možné jej implementovat do výrobní linky, v kapitole 2.4 *Návrhy propojení stroje s linkou* je popsáno celkem 5 způsobů, jak toho docílit. Pravděpodobně nejlepším způsobem by bylo propojit zařízení s odvodním potrubím, které by vedlo do skladu recyklované PU pěny. Sklad by mohl být propojen skrze potrubí se speciální dávkovací hlavicí, která umožňuje k nově vznikající PU pění dodat další materiál. Tento materiál je v hubici hnán vzduchem, kterým je recyklát ze skladu odváděn. Toto řešení by bylo možné uplatnit zejména u laciných výrobků a bude použito na B-stranu, aby nehomogenitami nenarušovalo funkční (komfortní) zónu.

Po konzultaci s Ing. Jandou z firmy Proseat a po výsledcích, kterých recyklát dosáhnul, bylo uznáno, že tento postup na výrobu nových pěn do automotive s recyklátem je nevhodný. Z tohoto důvodu by k recyklaci mohly být použity jen tzv. zmetky z výroby, jejichž původ je jasně prokazatelný. Použití starých pěn by mohlo najít uplatnění v jiné aplikační oblasti, například pro výrobu matrací, izolací, výplní, apod.. Dalším problémem, který vyvstává u automobilových pěn, jsou emisní předpisy při hoření, které již dnes jsou pro PU pěnu hraniční. Po přidání jakéhokoliv dalšího komponentu do PU pěny by emisní hodnota mohla velice pravděpodobně vzrůst a takové materiály jsou z tohoto důvodu v automobilovém průmyslu nepoužitelné. Pokud by nebyl brán zřetel na emisní normy, bylo by možné, pomocí speciálních míchacích hlav, aplikovat recyklát už do rostoucí PU pěny. Bohužel tato speciální míšící hlava se nachází v Belgii a není možné na ní experiment zkusit. Další možnou aplikací, by mohlo být aplikování recyklátu na B-stranu již rostoucí PU pěny. K tomuto experimentu by musely být vyvinuty nové formy, které by umožnily provádět tuto specifickou aplikaci. Zároveň by tento postup mohl být riskantní z důvodu zastavení celkového procesu vypěňování ve

formě. V úvaze je také další použití recyklátu jako samostatného produktu, který by mohl být využit v sedačkách podobných tzv. fatboy.

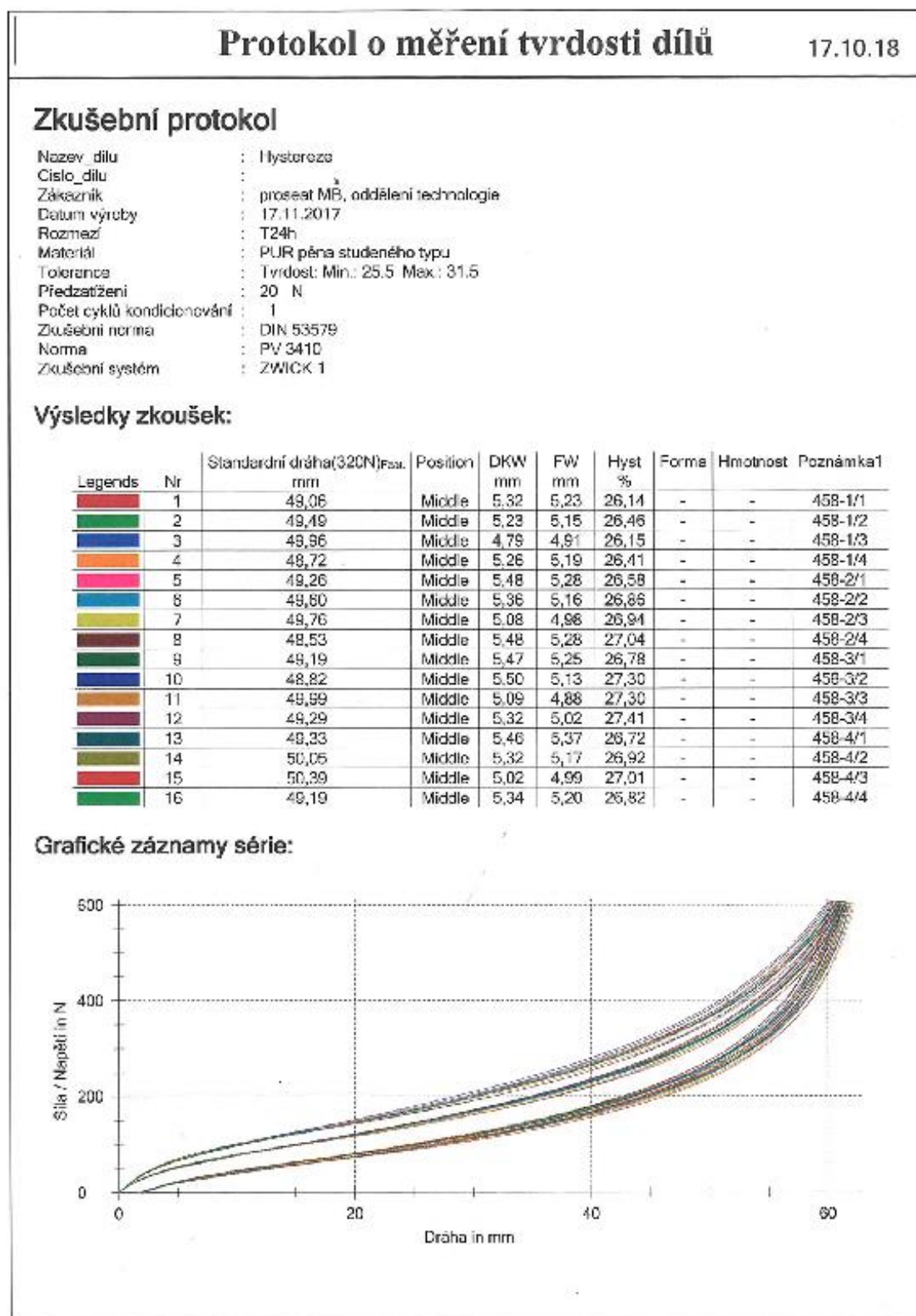
5.ZÁVĚR

Z výsledných časů a vzorků je zřejmé, že je recyklační zařízení funkční. Požadavky na homogenitu recyklátu, automatizaci výroby a možnosti propojení s linkou byly splněny. Zařízení bylo téměř plně automatické, a odvádělo recyklovaný materiál do předem připravené části. Odtud mohl být recyklát použit k výrobě nové pěny nebo jiného nového výrobku. Recyklační zařízení má své využití a celkovou recyklaci zrychlilo a celý postup zautomatizovalo. Toto jsou dva hlavní parametry, při vytváření nových zařízení k průmyslovému využití. Důležitým faktorem je také, že zařízení bylo vyrobeno z dostupných materiálů, které mohly být případně jinak nastaveny. Recyklační zařízení, které bylo vyrobeno za účelem homogenní recyklace PU pěn, obstálo v testování velice dobře a recyklát jím vyprodukovaný byl homogenní a tvořily ho zejména malé částice, jak bylo autorem zamýšleno.

Z důvodu absence speciální míchací hlavy, nebylo možné aplikovat recyklát rovnoměrně do forem, ale bylo nutné ho aplikovat na A-stranu nově vznikající PU pěny a nevznikaly tak homogenní výrobky, nýbrž výrobky s jasnou povrchovou vadou, (detail vady je zobrazen na obrázku číslo 43). Byly vyrobeny 4 vzorky, z toho byl jeden referenční a zbylé tři měly různé hodnoty obsahu recyklátu. Tyto vzorky byly testovány na hysterezi a tvrdost v certifikovaných laboratořích firmy PROSEAT dle normy DIN 53579, výstupní formulář z této zkoušky je obsažen v příloze. Jiné testy nebyly provedeny z důvodu absence zkušebních nástrojů, nevypovídajících hodnot měření nebo z finančních důvodů.

V dnešní době se již pracuje na nové pěně, která dokáže obstát v přísnějších emisních zkouškách. Jedná se o produkt s obchodním názvem Trocellen. Nicméně tato pěna momentálně nedosahuje komfortu PU pěny.

6. PŘÍLOHY



Hystereze_2018-10-17_07-49.zs2

Strana1/2

Obr. 1. výsledky hystereze z testování vyrobených a referenčních vzorků [16]



Obr. 2 . Mechanicky recyklovaná PU, získaná z laboratoří firmy PROSEAT[16]



Obr. 3 . Vzorek Trocellenu [16]

7. LITERATURA

- [1] VERDOLOTTI, Letiziai, Maria R. DI CAPRIO a Marino LAVORGNA. *Polyurethane Polymers: Chapter 9 – Polyurethane Nanocomposite Foams: Correlation Between Nanofillers, Porous Morphology, and Structural and Functional Properties* [online]. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128040652000097>
- [2] *Zpracování PU pěň* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://tvi-PU.cz/zpracovani-polyuretanovych-PU-pen-nastrikem-a-litim/>
- [3] Krebsová, M.: *Nauka o polymerech*, Skriptum TU Liberec 1979, 188-189
- [4] LEDERER, Jaromír. *Polyuretany* [online]. UJEP [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/Polyuretany.pdf>
- [5] *Proseat: We PUs products forward.* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.proseat.de/proseat>
- [6] GRUNDOVÁ, Hana, Marta HEPTNEROVÁ a Milana SOUKUPOVÁ. *VÝUKA CHEMIE A HYDROLOGIE V REGIONU SOUBOR PRACOVNÍCH LISTŮ* [online]. [cit. 2018-05-15].
- [7] *In touch: Flexible polyurethane foam* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.pfa.org/intouch/new_pdf/lr_IntouchV1.2.pdf
- [8] LEE, S.T. a N.S. RAMESH. *Polymeric foams: Mechanisms and Materials* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=6jOd7aJRB0YC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=polymeric+foams-mechanisms+and+materials&source=bl&ots=K9DGOle3jC&sig=C9W#v=onepage&q&f=false>
- [9] Jirsák, O., Kalinová, K. : *Netkané textilie* Skriptum TU Liberec 2003, str. 42
- [10] DOUTRES, Oliver a Atalla NOUREDDINE. *Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/8780/1/Doutres%20O.%202011%208780%20Effect%20of%20the%20microstructure%20closed%20pore%20content.pdf>
- [11] Krebsová, M.: *Nauka o polymerech*, Skriptum TU Liberec 1979, 188-189
- [12] SZYCHER, M. *Szycher's handbook of polyurethanes*. Boca Raton: CRC Press, c1999. ISBN 0-8493-0602-7.

- [13] UHLIG, Konrad. *Polyurethan-Taschenbuch: mit 34 Tabellen*. 3. Aufl. München [u.a.]: Hanser, 2006. ISBN 3446403078.
- [14] K. M. Zia, H. N. Bhatti, U. A. Bhatti; Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review; *Reactive & Functional Polymers* 67 (2007) 675–692
- [15] J. Mleziva; *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*; Praha 2000; 537s.; ISBN 80-85920-72-7
- [16] Odborné diskuze a odborná prezentace výrobní linky firmy Proseat panem Ing. Petrem Jandou
- [17] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [18] *Biopaliva ve formě pelet a krátkého kusového dříví* [online]. Mendelova univerzita v Brně, , 67 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: file:///C:/Users/Pc%20Gava/Downloads/zaverena_prace.pdf
- [19] *Ústav fyziky materiálů: Servohydraulický pulsátor Zwick/Roell Amsler HC25, tah-tlak* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.ipm.cz/vybaveni/servohydraulicky-pulsator-zwick-roell-amsler-hc25-tah-tlak-17>
- [20] *SOUDAL PU FOAMS* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.soudal.com.sg/pu-foams/>
- [21] *Video for How to make pu polyurethane foam motorcycle car seats* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.machinepu.com/en/News/525.html>
- [22] *Autosedacky* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/sedacky-v-autech-drive-a-nyni/r~i:gallery:30978/r~i:photo:557208/?redirected=1543861417>
- [23] *Ústav nábytku, designu a bydlení. Disertační práce* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/45964321-Ustav-nabytku-designu-a-bydleni-disertacni-prace.html>
- [24] *Describe the development and structure of gas bubbles in polyurethane foams*. [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/5724
- [25] *Mini Sofa Bed with High Elasticity PU Foam* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.polystyrene-recycling.org/archives/532>
- [26] *Atomová hmotnostní konstanta: (Unifikovaná) atomová hmotnostní jednotka, dalton* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z:

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A1_hmotnostn%C3%AD_konstanta#\(Unifikovan%C3%A1\)_atomov%C3%A1_hmotnostn%C3%AD_jednotka,_dalton](https://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A1_hmotnostn%C3%AD_konstanta#(Unifikovan%C3%A1)_atomov%C3%A1_hmotnostn%C3%AD_jednotka,_dalton)

[27] *PROPERTIES OF THE POLYURETHANE (PU) LIGHT FOAMS* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z:

<http://www.pg.gda.pl/mech/kim/AMS/022006/AMS02200605.pdf>

[28] ŠAFARÍKOVÁ, Barbora. *Recyklace pěnových materiálů* [online]. Mendelova univerzita v Brně, , 54 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/17278/%C5%A1afa%C5%99%C3%ADkov%C3%A1_2011_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[29] *DIN 53579* [online]. 2015 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: https://glo-bal.ihs.com/doc_detail.cfm?&rid=GS&document_name=DIN%2053579&item_s_key=00516757&item_key_date=840830

[30] *Encyklopedie Fyziky: Pohyb hmotného bodu po kružnici* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/15-pohyb-hmotneho-bodu-po-kruznici>

[31] PALIČUKOVÁ, Miroslava. *Vývoj zařízení pro zkoušení prodyšnosti objemových materiálů za provozních podmínek*. Liberec, 2009. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.

[32] *RECYKLACE PLASTŮ: ZÁKLADNÍ BILANCE A ZPŮSOB NAKLÁDÁNÍ S ODPAVNÍMI PLASTY Z KOMUNÁLNÍHO SBĚRU* [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/14_%20RECYKLACE%20PLASTU.pdf

[33] *Digitální mikroskop Levenhuk DTX 90* [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: https://www.zoom-n-joy.cz/katalog/mikroskop-levenhuk-dtx-90/?gclid=EA1aIQob-ChMI2tLciPqL3wIVReR3Ch3kFQrTEAQYASABegIBkvD_BwE#.XA16gmhKi00

[34] *TESTOVÁNÍ STATISTICKÝCH HYPOTÉZ: Hypotézy o rozptylu* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/kap11/kap12.htm>