

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Polymerní izolační materiály pro stavebnictví

Bakalářská práce

Josef Sedláček

Bakalářská práce
2019

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef Sedláček**
Osobní číslo: **C16342**
Studijní program: **B2829 Anorganické a polymerní materiály**
Studijní obor: **Polymerní materiály a kompozity**
Název tématu: **Polymerní izolační materiály pro stavebnictví**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

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

1. Vypracujte literární rešerši na oblast využití polymerních materiálů ve stavebnictví. Pozornost zaměřte především na polymery používané jako izolační materiály. V literární rešerši zpracujte přehledně výčet nejdůležitějších informací proč jsou polymerní materiály vhodné pro použití jako izolanty.
2. Uveďte přehled druhů polymerních izolací.
3. Shrňte technologie používané pro výrobu polymerních izolací.
4. Uveďte příklady nejčastěji používaných izolantů, jejich výhody a nevýhody, oblast použití i přehled firem vyrábějících izolační polymerní materiály.
5. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 "Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu".

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Večeřa, CSc.

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jakub Janák

Polyplasty, s.r.o. Jaroměř

Datum zadání bakalářské práce:

21. prosince 2018


Termín odevzdání bakalářské práce:

4. července 2019



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 1. 7. 2019

Josef Sedláček

ANOTACE

Tato bakalářská práce pojednává o polymerních tepelně izolačních materiálech, které se využívají ve stavebnictví. Poskytuje základní přehled o těchto materiálech a jejich vlastnostech, které hrají roli při výběru vhodného typu izolace. Zabývá se výrobou a aplikacemi pro izolace nejčastěji používaných syntetických polymerů, kterými jsou polystyreny, polyuretany a fenoplasty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymery, izolace, pěnové materiály, polystyren, polyuretan, polyisokyanurát, fenolformaldehydové pryskyřice, fenolické pěny

TITLE

Polymeric insulation materials for the building industry

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with polymeric thermal insulation materials, which are used in building industry. It provides an overview of these materials and their properties that play role in selecting the appropriate type of insulation. It deals with the production and applications of the most commonly used synthetic polymers, which are polystyrenes, polyurethanes and phenoplasts.

KEYWORDS

Polymer, insulation, foam materials, polystyrene, polyurethane, polyisocyanurate, phenol-formaldehyde resins, phenolic foam

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Základní veličiny a pojmy.....	9
3. Rozdělení izolačních materiálů.....	15
3.1. Přírodní stavební izolační materiály.....	15
3.2. Syntetické stavební izolační materiály.....	16
4. Polystyrenové izolace	18
4.1. Výroba PS - obecně.....	19
4.1.1. Kontinuální bloková polymerace.....	20
4.1.2. Suspenzní polymerace	20
4.2. Výroba zpěňovatelného polystyrenu.....	20
4.3. Zpracování zpěňovatelného polystyrenu.....	21
4.4. Expandovaný polystyren EPS	23
4.4.1. Pevnost EPS.....	23
4.4.2. Systémy ETICS.....	24
4.4.3. Hořlavost EPS.....	25
4.4.4. Bílý EPS a jeho vlastnosti.....	26
4.4.5. Šedé grafitové EPS desky	27
4.4.6. Perimetr.....	28
4.5. Extrudovaný polystyren XPS	28
4.5.1. Výroba XPS	28
4.5.2. Vlastnosti a použití XPS	29
5. Polyuretanové izolace	30
5.1. Výroba polyuretanů obecně	30
5.1.1. Isokyanáty, vznik a jejich reaktivita	31
5.1.2. Polyoly	33
5.1.3. Katalyzátory.....	34
5.2. Výroba a vlastnosti lehčených polyuretanů	34
5.2.1. Měkké PUR pěny.....	35

5.2.2. Tvrdé PUR pěny	36
5.3. Základní způsoby zpracování PUR pěn	36
5.4. PIR - polyisokyanurát.....	38
6. Pěněné fenoplasty	40
6.1. Výroba novolaků a rezolů	40
6.2. Výroba a vlastnosti izolačních fenoplastů.....	42
7. Závěr	44

1. Úvod

Izolace staveb jsou lidstvu známa již od pradávna, neboť zajištění dostatečně teplého obydlí bylo základní podmínkou pro přežití a bylo také spojeno s vytvářením určitého životního standardu a pohodlí. Už od počátků civilizace se lidstvo snaží vytvářet svá obydlí tak, aby teplota uvnitř stavby příliš nekolísala. Jako první se pro tento účel využívaly přírodní materiály. Nejprve přepážku mezi venkovním prostředím a interiérem tvořila různě zpracovávaná hlína, která se postupně vylepšovala tak, že k ní byly vkládány vrstvy sena, slámy, lišejníků nebo ovčí vlny. Tento přístup ve stavitelství se stával samozřejmostí a vznikaly tak první zateplovací systémy. Mezi první sofistikovanější izolace patřily heraklitové desky, což jsou v podstatě slisovaná dřevěná vlákna.

S technologickým pokrokem na počátku 20. století však přichází nové možnosti ve všech oblastech stavitelství a tím pádem i v oblasti izolačních systémů. Díky velkému rozmachu chemického průmyslu se začínaly objevovat do té doby neznámé polymerní materiály, které mimo jiné své vlastnosti vykazovaly velmi nízkou tepelnou vodivost. Revoluci způsobil bílý polystyren, který se začal na izolace ve větším měřítku používat v padesátých letech minulého století a používá se dodnes. Dalšími nejvíce používanými polymery pro zateplení staveb jsou hlavně polyuretany, polyisokyanuráty odvozené z polyuretanů a méně časté fenolické pěny. Tato bakalářská práce je proto zaměřena na výrobu a vlastnosti těchto materiálů.

Proč jsou polymery vhodné pro izolace ?

Největší výhodou polymerních materiálů z pohledu izolací je fakt, že je lze napěňovat. Polymerní pěny totiž obsahují plyn, který tvoří většinu objemu celého izolačního systému a plní hlavní izolační funkci. Nejčastěji to bývá vzduch, který je extrémně špatný vodič tepla. Díky malému obsahu tuhé polymerní fáze jsou polymerní izolace lehké, což je velmi výhodná vlastnost. Čím lehčí zateplovací systém je, tím snadnější je jeho ukotvení. Právě snadnost aplikace je potom jeden z faktorů, na který se soustředíme při výběru vhodného materiálu. Polymerní pěny jsou navíc rozměrově stálé i při velkých výkyvech teplot. Díky tomu se izolační desky mohou pokládat těsně vedle sebe a nemusíme se bát, že by se při velkých teplotách roztahovaly a vznikaly tak praskliny nebo vypouklá místa. Současné technologie umožňují vytvářet pěnové polymerní látky, které vykazují poměrně velkou pevnost, což oceníme především při izolaci podlah, teras, plochých střech a všude tam, kde očekáváme větší zátěž. Navíc také dobře tlumí kročejevý hluk a slouží tedy také jako akustická izolace. Nevýhodou polymerních materiálů je jejich hořlavost. U některých, například polyisokyanurátů, se navíc při hoření mohou uvolňovat toxické a zdravotně závadné látky. Proto se do polymerních hmot přidávají retardéry, které tlumí proces hoření.

2. Základní veličiny a pojmy

Pro popis izolačních materiálů a zejména pak jejich porovnávání je důležité znát některé základní pojmy, veličiny a jejich součinitele, které s danou tematikou souvisejí. Pro základní tepelně technické výpočty z hlediska stavebního inženýrství je důležité mít k dispozici pro každý materiál jeho tepelnou vodivost, faktor difúzního odporu, objemovou hmotnost a měrnou tepelnou kapacitu. Tyto hodnoty lze v naprosté většině případů převzít z podkladů výrobce nebo z tabulek, které najdeme v normách. Důležité je také znát třídu hořlavosti, do které se daný materiál řadí.

Sdílení tepla

Ke sdílení tepla může docházet třemi základními způsoby:

- vedením (tzv. kondukce)
- prouděním (konvekce)
- sáláním (též zářením)

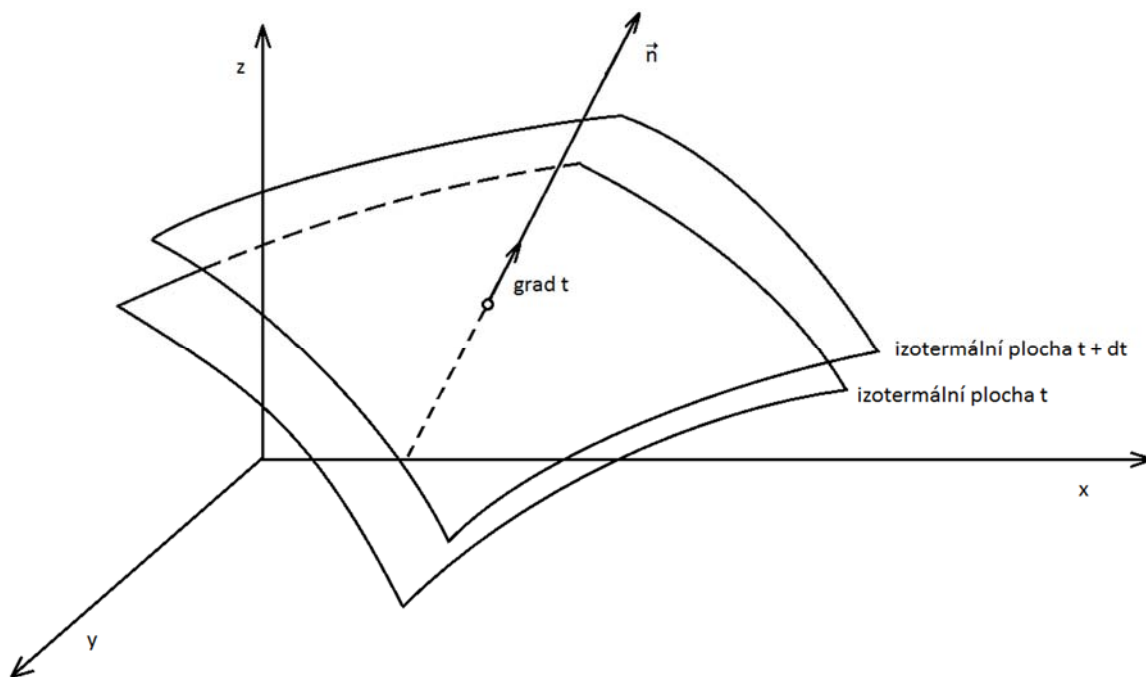
Na procesu tepelného sdílení se většinou podílí všechny mechanismy současně, nicméně pro zjednodušení děje je možné soustředit se na mechanismus převládající a vliv ostatních mechanismů zanedbat. Pro popis izolačních polymerních materiálů používaných ve stavebnictví je nejdůležitějším typem sdílení tepla kondukce, neboli sdílení tepla vedením. Bude nás totiž zajímat především teplotní vodivost materiálu, ze které se dá zjistit součinitel prostupu tepla.

Teplotní pole, teplotní gradient

Teplotní pole je oblast, kde každému bodu v prostoru v daném okamžiku přiřadíme určitou teplotu. Teplota je v tomto případě funkcí polohy a času. V této oblasti lze vytvářet izotermické plochy, což jsou místa se stejnou teplotou. Teplotní gradient je potom vektor, který představuje směr růstu teploty v teplotním poli. Záporná hodnota teplotního gradientu se nazývá teplotní spád. Ten je důležitý v dalších rovnicích pro výpočet hustoty tepelného toku a tepelné vodivosti.

Na obrázku č. 1 jsou dvě izotermální plochy dvou různých teplot. Vektor n je normálový vektor první izotermy teploty t a je na ni tedy kolmý. Pro teplotní gradient platí:

$$\text{grad } t = \vec{n} \cdot \frac{\partial t}{\partial n}$$



Obrázek 1

Tepelný tok, hustota tepelného toku

Teplotní pole je možné ohraničit určitou "kontrolní" plochou. Tepelný tok je teplo, které prochází touto plochou za jednotku času a jeho jednotka je Watt. Hustota tepelného toku je vektorovou veličinou, která bývá značena \vec{q} a má směr sdílení tepla. Velikost této hustoty je tepelný tok jednotkovou plochou kolmou na směr sdílení tepla. V podstatě tato hustota vyjadřuje množství tepla Q , které projde plochou S za čas t .

$$\vec{q} = \frac{Q}{S \cdot t}$$

Fourierův zákon, teplotní vodivost

To, jak dobře je teplo látkou vedeno, závisí především na vlastnostech látky a na uspořádání tepelného pole. Podle Fourierova zákona, který platí pro sdílení tepla vedením, je hustota tepelného toku úměrná teplotnímu spádu ($-\text{grad } t$), který je vynásobený teplotní vodivostí dané látky:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t$$

Pro homogenní ustálený tepelný tok se dá tento výraz zapsat také rovnicí:

$$\frac{Q}{t \cdot S} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

kde Q je teplo [J], t je čas [s], S je plocha [m^2], λ je teplotní vodivost [W/mK], ΔT je změna teploty [K], d je vzdálenost ploch prostupu tepla [m].

Teplotní vodivost λ [W/mK] je pro popis izolací velmi důležitá. Vyjadřuje totiž schopnost materiálu vést teplo. Díky teplotní vodivosti se dá určit rychlost šíření tepla z teplé části stavby do chladnější. Potřebné hodnoty λ jsou k nalezení v normách a nebo přímo u výrobců izolačních materiálů. Platí, že čím má materiál nižší součinitel teplotní vodivosti, tím lepší je izolant a teplo tímto materiálem prostupuje pomaleji.

Za tepelně izolační materiál považujeme takový, který omezuje šíření tepla velkou měrou. Jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti by neměla překračovat 0,1 W/mK. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty teplotních vodivostí některých základních druhů pěnových plastických izolací.^[1]

Izolace	ρ_{dn}	λ_p
	[kg/m ³]	[W/m.K]
Polystyren pěnový expandovaný EPS	10	0,051
	20	0,044
	30	0,039
	40	0,037
	50	0,037
	60	0,039
Polystyren pěnový vytlačovaný XPS	30	0,034
Polyuretan pěnový tuhý - pěněný freonem, neplášťovaný	35	0,032
Polyuretan pěnový tuhý - pěněný freonem, plášťovaný plechem	35	0,029
Polyuretan pěnový, měkký	35	0,048
Formaldehyd. pěn. pryskyřice struktura otevřená	20	0,037
	30	0,041
	40	0,045
	50	0,061
Formaldehyd. pěn. pryskyřice struktura uzavřená	25	0,041
	30	0,050
	50	0,060
Fenolická pěna firmy Kingspan ^[32]	35	0,020

Tabulka 1 ^[1]

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla U_T [W/m^2K] nám říká, kolik se ztratilo tepla vedením skrze izolační materiál o ploše $1 m^2$ při změně teploty o 1 stupeň K. Dává nám informaci o izolačních vlastnostech celé konstrukce (např. stěna, ale i okno) a je převrácenou hodnotou tepelného odporu R_T .

$$U_T = \frac{1}{R_T}$$

Tepelný odpor R_T vyjadřuje schopnost materiálů zabraňovat ztrátě tepla. Je přímo úměrný tloušťce vrstvy a nepřímo úměrný koeficientu teplotní vodivosti daného materiálu.

$$R_T = \frac{d}{\lambda}$$

Jako příklad prostupu tepla poslouží představa izolovaného prostoru, který je rozdělen na dvě stejně velké části pěnovou polystyrenovou deskou viz obrázek 2. Prostor má čtvercový průřez $1 m^2$ a první část z prostorů je o jeden stupeň teplejší než druhá. Pokud bude deska tlustá 12 cm a součinitel tepelné vodivosti této PS desky bude $\lambda = 0,033 W/mK$, potom můžeme snadno vypočítat R_T a U_T .

$$R_T = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,12}{0,033} = 3,636 m^2K/W$$

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{3,636} = 0,275 W/m^2K$$

$$0,275 \frac{W}{m^2K} = 0,275 \frac{J}{s} \cdot \frac{1}{m^2K} = 990 \frac{J}{h} \cdot \frac{1}{m^2K}$$

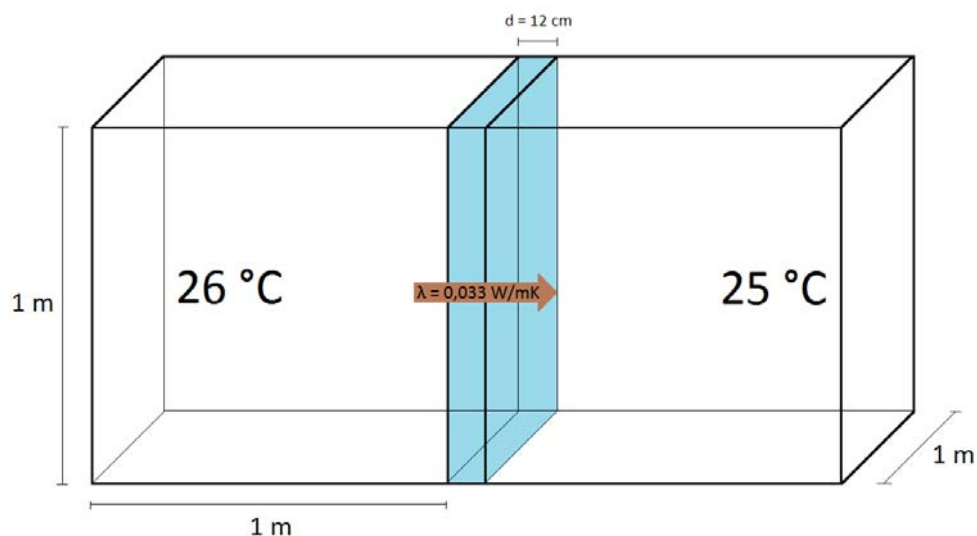
Watt je 1 Joul za 1 sekundu. Za jednu hodinu se tedy přes tuto polystyrenovou desku přesune $990 J$ tepelné energie do chladnějšího prostoru. Pro představu, k ohřátí 1 kg vody o 1 stupeň K, je potřeba přibližně $4200 J$ (tepelná kapacita vody), což je více než čtyřnásobek tepelné energie, kterou jsme "ztratili" přes tuto polystyrenovou izolační desku za hodinu. Polystyren tedy jako izolant funguje dobře, musí se ovšem jednat o lehčený polystyren EPS nebo XPS. Hodnoty λ u nelehčeného polystyrenu rozhodně nedosahují tak nízkých hodnot.

V případě výpočtu odporu tepla pro celou konstrukci se jednotlivé tepelné odpory sčítají.

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

kde R_T je úhrnný tepelný odpor, R_{si} je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce, R je odpor konstrukce a R_{se} je odpor při přestupu tepla na vnější straně. Tento součet se použije samozřejmě i pro výpočet celkového součinitele prostupu tepla celé konstrukce.^[2]

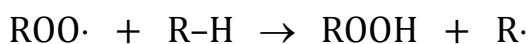
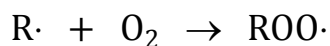
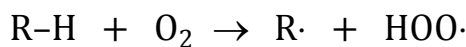
$$U_T = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$



Obrázek 2

Hořlavost polymerních izolačních materiálů

Stavební izolační materiály by měly být, mimo jiné své vlastnosti, bezpečné v případě požárů. Proto se klade důraz na to, aby byly nehořlavé nebo hořely obtížně. Polymerní materiály mají ale tu nevýhodu, že už ze své podstaty (jelikož jsou organické povahy) jsou více či méně hořlavé. Jejich hořlavost závisí především na struktuře a stavbě makromolekul a také na tom, v jaké koncentraci je při hoření přítomen kyslík. Vysokou hořlavost můžeme sledovat u polymerů, které se rozkládají na monomer nebo mají hořlavé produkty po spálení. Mezi takové polymery patří PE, PP, PS, PMMA, umělý i přírodní kaučuk, POM (polyformaldehyd) a další. Naopak špatně hoří polymery, které ve své struktuře obsahují halogeny a také ty, které při vysokých teplotách odštěpují vodu. Obecně však platí, že čím více je v makromolekule vodíku, tím více je materiál hořlavý. R-H úseky totiž při vysoké teplotě v přítomnosti kyslíku dávají vzniknout radikálu $R\cdot$ a hoření je potom v podstatě řetězovou reakcí viz následující rovnice:



Hořlavost polymerů však můžeme regulovat a tomuto procesu obecně říkáme retardace hoření, která funguje na několika základních principech. Jedním z nich je právě snížení koncentrace R-H úseků. Další možnost je použít látku, která spotřebuje kyslík na svou vlastní přeměnu a je tedy "obětována" pro polymer. Pojem retardéry pak nejčastěji používáme pro látky, které fungují jako inhibitory řetězové reakce. Takto využívané látky jsou především:

- Na bázi fosforu – PCl_3 , POCl_3 používané pro PVC, PVA, PE. Vytvářejí polymetafosforečné kyseliny, které izolují povrch polymeru.
- Halogenové – nejlepší jsou alifatické na bázi Br, které se používají např. pro polystyrenové plasty a PES. Při hoření pak vzniká halogenovodík HX, který následně reaguje s radikály na málo hořlavé produkty.
- Oxid antimonitý – má především synergický účinek v přítomnosti dalších zhašedel. Snižuje tvorbu $\text{R}\cdot$ a způsobuje uhelnatění.

Podle schopnosti odolávat ohni dělíme materiály do několika kategorií, označené A1, A2, B, C, D, E a F, přičemž směrem od A1 po F se ohnivzdornost zhoršuje. Základní popis jednotlivých kategorií poskytuje následující tabulka 2. Podrobnější tabulka je k dispozici ze zdroje [3].

Třída A2	- nepřispívají požáru (ani v případě plně rozvinutého) - vyhovují všem požadavkům pro všechny nižší třídy
Třída A1	- vyhovují stejným kritériím jako B - navíc při plně rozvinutém požáru nebudou přispívat dalšímu růstu požáru - při plně rozvinutém požáru nepřispívají kalorickému zatížení*
Třída B	- stejná kritéria jako C, ale přísnější požadavky
Třída C	- stejná kritéria jako D, ale přísnější požadavky - při tepelném působení hořícího předmětu vykazují omezené rozšíření plamene
Třída D	- vyhovují kritériím pro třídu E, ale navíc jsou schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez významného rozšíření - na teplo uvolňované hořícím předmětem reagují se zpožděním
Třída E	- odolají působení malého plamene pouze na krátký časový interval
Třída F	- pro tyto materiály/výrobky nebyla zjištěna žádná třída a nejsou klasifikovány

* množství tepla, které může být uvolněno dokonalým shořením všech hořlavých materiálů

Tabulka 2 ^[3]

Faktor difuzního odporu

Difuze je proces, kdy molekuly látky samovolně přechází z prostředí jejich vyšší koncentrace do prostředí, kde je jejich koncentrace menší. Ve stavebnictví jde v první řadě o difuzi vodní páry obsažené ve vzduchu skrze stěny, které oddělují dva prostory o různých parciálních tlacích vodní páry. Ta může kondenzovat a vytvářet nežádoucí vlhkost, která je ideálním prostředím pro vznik plísní.

Pro vyjádření schopnosti materiálu propouštět vodní páru používáme faktor difuzního odporu μ . Vyšší hodnota μ tedy znamená menší množství páry, která skrz materiál projde. Problém nastává zejména v situaci, kdy difuzní odpor narůstá směrem od interiéru ven. To má totiž za následek akumulaci vodní páry ve stěně.

U materiálů porovnáváme ekvivalentní difúzní tloušťku s_d , která se vypočítá součinem μ a tloušťky daného materiálu.

$$s_d = \mu \cdot d$$

Podává informaci o tom, jak silná musí být vrstva vzduchu, aby měla hodnotu difuzního odporu stejnou jako zkoušený materiál. Faktor difuzního odporu materiálu je difuzní odpor materiálu dělený difuzním odporem vzduchu a proto se jedná o bezrozměrný údaj. Hodnoty μ některých polymerních izolací jsou uvedeny v tabulce 3. [1]

Izolace	μ_n
Polystyren pěnový, vypěnovaný - EPS	40-67
Polystyren pěnový, vytlačovaný - XPS	100
Tuhý PUR pěněný freonem	180-260
Polyuretan pěnový, měkký	2,5
Formaldehydr. pěn. pryskyřice struktura otevřená	2,50-6,50
Formaldehydr. pěn. pryskyřice struktura uzavřená	14
PVC pěněné	265

Tabulka 3 [1]

3. Rozdělení izolačních materiálů

Mezi úplně nejstarší známé materiály, které zamezovaly únikům tepla bezesporu patřily přírodní rostlinné materiály jako je seno, sláma a lišejníky. Z živočišných přírodních materiálů to byla vlna. Díky technologickému pokroku a objevu polymerních látek ve 20. století se seznam izolačních materiálů velmi rozrostl a dnes je jich na trhu poměrně velké množství. Základní rozdělení izolačních technologií je tedy podle použitého materiálu na přírodní a syntetické.

3.1. Přírodní stavební izolační materiály

Izolace rostlinného původu jsou stále velmi často používané a u některých se jejich hodnoty teplotní vodivosti vyrovnají syntetickým materiálům.

- **Izolace ze dřeva** – patří sem především dřevovláknité desky vyráběné z odpadů dřevozpracovatelských podniků. Mimo svoje tepelně izolační vlastnosti dobře odhlučňují a mají vysokou pevnost v tlaku.^[4] Jsou vyráběny lisováním dřevěných vláken za působení

vysoké teploty. Teplotní vodivost se pohybuje okolo 0,046 W/mK.^[1] Do této kategorie také patří dřevní vlna a piliny nebo korek z korkového dubu.^[4]

- **Rostlinné vláknité izolace** – z domácích zemědělských plodin je to především len, sláma a také konopí, světově jde hlavně o produkty z bavlníku a jutovníku. Vlákna jsou rozčesávána a spojována do rohoží. Lze také využít pazdeří (hlavně lněné a konopné), které slouží k výrobě desek. Sláma je jedním z nejdéle využívaných materiálů pro izolace a používá se dodnes, neboť slaměné desky vyráběné lisováním jsou levné a účinné. Celulóza získávaná ze dřeva, starého papíru nebo rostlin se dá použít jako izolace také ve formě foukaných vložek.^[4] Z džínů a zbytků z textilního průmyslu lze vyrábět izolační džínovinu, která je díky recyklačnímu způsobu výroby šetrná k životnímu prostředí.^[4]

Izolaci živočišného původu je ovčí vlna a jde v podstatě o vlákno z keratinu. Jedním z českých výrobců je např. Naturwool, který prodává izolační rouna a pásy z ovčí vlny z Valašska. U výrobku A500 Naturwool uvádějí hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,040 W/mK.^[5]

3.2. Syntetické stavební izolační materiály

Synteticky vyráběné izolační materiály z hlediska chemického složení dělíme na **minerální** a **polymerní**. Další kategorií jsou nové speciální technologie, jako jsou aerogely, kalcium-silikátové desky a vakuové izolace.

Polymerní pěnové izolace	Minerální izolace
PS – polystyrenové izolace	Kamenná vlna
» EPS – expandovaný polystyren	Skelná vlna
» Šedý EPS – s příměsí grafitu	Keramická vlna
» XPS – extrudovaný polystyren	Pěnové sklo
PUR – pěny z polyurethanu - měkké/tvrde	Kalcium-silikát
PIR – pěny z polyisokyanurátu	Keramzit
PF – pěněné fenolické pryskyřice	Perlit
PE, PP – pěněný polyethylen, polypropylen	Speciální izolační technologie
PVC – pěněný polyvinylchlorid	Aerogel
Pěnový kaučuk	Vakuová izolace

Tabulka 4

Skelné a minerální vlny (těž vaty) mají hodnoty součinitele tepelné vodivosti v rozmezí od 0,030 do 0,040 W/mK a jsou tedy dobrými tepelnými izolanty, navíc výborně tlumí zvuk. Často se pro ně používá zkratka MW (mineral wool). Jako izolace se používají více než 70 let a v Česku a na Slovensku mají díky vyspělému sklářskému průmyslu dlouholetou tradici. Hlavní surovinou pro jejich výrobu je odpadové sklo. Jejich velkou výhodou jsou vlastnosti jako nehořlavost a také odolnost proti plísním.

Tato bakalářská práce je však zaměřena na stavební izolační materiály ze syntetických polymerů a proto se v následujícím textu zaměřuji podrobněji na levou část seznamu (tabulka 4 – pěnové polymery). Polymerní izolace se mezi sebou liší vlastnostmi, které vyplívají ze způsobu jejich výroby a zpracování. Vždy se jedná o lehčený polymer a zajímá nás tedy způsob výroby lehčené hmoty, tedy způsob, jakým je polymerní hmota nadouvána.

Způsoby výroby lehčených polymerů

- **Pomocí plynu** - tento způsob se využívá u polystyrenu typu EPS. Při výrobě PS se při suspenzní polymeraci přidává do reakční směsi pentan. Ten je poté přítomen v kuličkách polystyrenu. Při zpracovatelském procesu se zvyšuje teplota na takovou hodnotu, při které těkavý pentan unikne z kuliček ven a tím je nafoukne.
- **Pomocí nízkovroucí kapaliny** - tento způsob se využívá u fenolických pěn. Do reakční směsi pryskyřice je přidávána látka, která se při vyšší teplotě začne vypařovat a díky tomu se hmota nadouvá. Použit se dá benzín, alkoholy a ketony.
- **Pomocí nadouvadla při extruzi** - polystyren typu XPS se vyrábí vytlačováním. Do taveniny polystyrenu se v extrudéru ve výtlačné části přidává nadouvadlo pod velkým tlakem. Z extrudéru je materiál vytlačován do atmosférického tlaku a právě rozdíl tlaků způsobí nafouknutí. XPS poté obsahuje uvnitř buněk plyn, který se k napěnění použil. Může to být CO₂, ethanol, nebo HFC.
- **Nadouvání produktem reakce** - tento způsob výroby je typický pro polyuretany a polyisokyanuráty. Vedlejším produktem reakce při jejich výrobě je CO₂. V průběhu reakce je plynu stále více, což způsobuje stálý nárůst objemu polymerní pěny. Růst pěny se zastaví až v momentě ukončení reakce.

Rozdělení podle formy aplikace

Dalším logickým rozdělením stavebních izolací je také to, v jaké formě se používají při jejich aplikaci. Z tohoto hlediska známe 4 základní druhy:

- Vlákenné – jsou to různě široké rohože a role.
- Tvarované – jedná se o desky, pásy, bloky a trubice. U polymerních izolací se jedná o nejčastější typ, neboť se zpracovávají především na desky.
- Sypké – ty mohou být volně nasypané nebo foukané. Patří sem minerální granule jako keramzit nebo perlit a také celulóza. V případě polymerních izolací se jedná o volně foukaný bílý polystyren.
- Pěnové – z tabulky 4 je vidět, že v podstatě skoro všechny polymerní izolace se používají ve zpěněných formách. Tuhé nezpěněné polymery mají hodnoty součinitele tepelné vodivosti nad 0,1 W/mK a nepoužívají se tedy primárně k tepelně-izolačním aplikacím.

Pěny se ovšem prodávají většinou ve tvaru desek, které mohou být navíc povrchově opatřeny foliemi, například z hliníku. Výjimku tvoří PUR a PIR nástřiky, které se aplikují přímo na místě speciální nástřikovou pistolí. Takto aplikovaný polyuretan (nebo polyisokyanurát) rychle zvětší svůj objem a poté ztuhne a drží na podkladu. Nakonec se ztuhlá nastříkaná pěna může seříznout do roviny, případně také natřít.

4. Polystyrenové izolace

Polystyren je dnes jedním z nejpoužívanějších synteticky vyráběných polymerů na světě. Používáme pro něj zkratku PS a v recyklační značce je označen číslem 6. Jedná se o lineární uhlovodíkový řetězec s fenylovým zbytkem, který je navázaný na každý druhý uhlík v hlavním řetězci. Polystyren se rozpouští v aromatických uhlovodících (toluen, ethylbenzen), halogenovaných uhlovodících, alifatických etherech (tetrahydrofuran), esterech (ethylacetát) a ketonech (butanon), ale nikoli v alifatických uhlovodících (hexan) a alkoholech (methanol).^[6] Je to poměrně pevný plast, který má bohužel tu nevýhodu, že je bez příměsí křehký. Jeho pevnost a reologické vlastnosti jsou ovlivněny především střední molekulovou hmotností, která se pohybuje od 150 000 do 400 000 g/mol. Obecně platí, že nárůst molekulové hmotnosti a tím pádem i delší řetězec znamenají viskóznější taveninu, vyšší teplotu T_f i lepší pevnost.

S polystyrenem se můžeme setkat v několika formách^[7]:

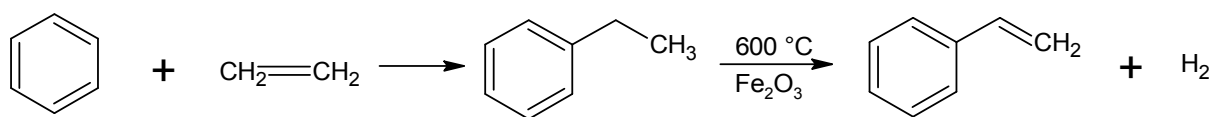
- Standardní PS - homopolymer styrenu, který je čirý, lesklý, poměrně pevný, ale křehký. Je citlivý vůči UV záření a také nepříliš tepelně odolný. Dobře známým výrobkem z tohoto druhu PS jsou například obaly na CD.
- Houževnatý PS - snížení nežádoucí křehkosti se docílí tak, že je v polystyrenu dispergován určitý podíl kaučuku. Výsledný materiál je neprůhledný a má lepší mechanické vlastnosti.
- Zpěnovatelný PS - obsahuje nadouvadlo (pentan). Takto upravený PS je možné vypěňovat. Používá se nejčastěji právě jako tepelně izolační materiál.
- Kopolymery PS - nejčastěji s akrylonitrilem, ale i dalšími monomery, což výslednému materiálu dodává větší tepelnou odolnost. ABS - jedná se o kopolymery styrenu, akrylonitrilu a butadienu. Produkty jsou houževnaté, tvrdé a mají široké využití hlavně jako konstrukční plasty v automobilovém průmyslu, např. kryty na zpětná zrcátka automobilu apod.

Pro stavební izolace je dnes polystyren jedním z nejužívanějších materiálů. Používají se zejména pěnové izolace, kterými jsou EPS (expandované polystyreny) a XPS (extrudované polystyreny). Liší se jak výrobou, tak vlastnostmi mechanickými a mírně i tepelně izolačními. Oba tyto druhy izolačních materiálů jsou dlouhodobě využívané, osvědčené a navíc poměrně levné. Používají se na izolace půdních stropů, střech, podlah, obvodových stěn, spodních stran

stropů a fasádní izolace. Pěnové polystyreny však nemají funkci pouze izolační, neboť se využívají také jako akustické tlumiče kročejového hluku a také se používají jako ochrana proti nárazu v obalech pro elektroniku, sklo a další křehké výrobky.

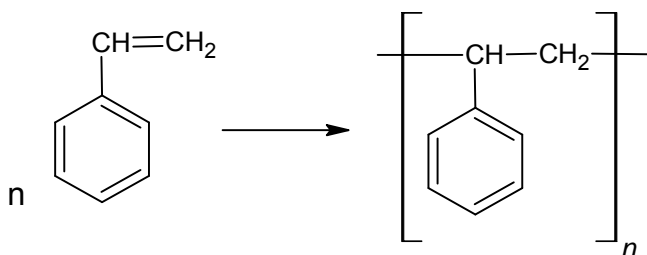
4.1. Výroba PS - obecně

Polystyren se vyrábí radikálovou polymerací z monomeru styrenu, při které vzniká ataktický, nebo při použití Ziegler-Nattových katalyzátorů syndiotaktický či izotaktický. Styren je bezbarvá až nažloutlá olejovitá kapalina, která má nasládlý zápach. Je podezřelý z karcinogenity a dráždí dýchací cesty, oči a kůži.^[8] Jeho teplota varu za atmosférického tlaku je 145 °C. Vyrábí se dehydrogenací ethylbenzenu, který se získává alkylací benzenu ethylenem, viz. rovnice 1.^[9]



Rovnice 1

Styren používaný pro polymeraci by měl mít čistotu vyšší než 99,6 %, protože nečistoty vznikající při způsobu jeho výroby, zejména ethylbenzen, kumen a xylen, ovlivňují molekulovou hmotnost polystyrenu. Polymeruje však velmi snadno i za normální teploty. Během jednoho roku dokonce do vysokého stupně konverze. Styren může fungovat jako donor i akceptor elektronů, může být tedy polymerován radikálovými, kationtovými nebo aniontovými mechanismy i koordinačními propagačními kroky^[10]. V praxi je však uplatňován zejména radikálový mechanismus, který můžeme nazvat volná radikálová vinylová polymerace (rovnice 2). Mezi hlavní technologie výroby PS patří bloková a suspenzní polymerace.



Rovnice 2

4.1.1. Kontinuální bloková polymerace

V případě blokové polymerace je s ohledem na provozní náklady velmi výhodné polymerovat styren do neúplné konverze. Proces tak může být kontinuální. Monomer se mísí s ethylbenzenem, se kterým je následně ohřátý vhnán do reaktorů. Iniciován je zvýšenou teplotou, kterou zajišťuje topné médium uvnitř reaktoru. Není tedy potřeba další látky, která by fungovala jako iniciátor, volný radikál totiž vznikne při srážce dvou molekul monomeru při tepelném pohybu molekul. Výsledkem blokové polymerace je viskózní roztok, ze kterého je dále v odparce za sníženého tlaku oddestilován nezreagovaný styren a ethylbenzen. Roztavený polystyren je poté veden do extruderu vybaveného evakuační zónou pro odstranění zbytku těkavých látek a nakonec je granulován. Takto získaný standardní PS se nejčastěji zpracovává injekčním vstřikováním a používá se především na spotřební zboží a v potravinářském průmyslu.^[7] Část izolačních pěnových desek se vyrábí extruzí standardního polystyrenu s vyšším stupněm krystalinity. Takové výrobky se označují jako XPS.

4.1.2. Suspenzní polymerace

Suspenzní polymerace, někdy také nazývána perlová, je proces probíhající v heterogenním prostředí. Monomer rozptýlený v kapalině, se kterou se nemísí, v sobě obsahuje iniciátor a sám sobě se tak stává reaktorem. Velikost kapiček monomeru je možné korigovat mícháním a teplotou. Aby se kapičky monomerů neshlukovaly a vznikající polymery neslepovaly, je nutné přidávat do směsi stabilizátory. Volba stabilizátoru je při suspenzní výrobě polystyrenu důležitá, neboť díky správně zvolenému stabilizátoru docílíme úzké distribuce velikosti perliček. Z pohledu rozpustnosti je dělíme na:

- stabilizátory rozpustné ve vodě – mají za úkol zvýšit viskozitu vodné fáze a ztěžovat tak splývání disperzních částic ve větší celky. Jako takový se používá například polyvinylalkohol.
- stabilizátory, které ve vodě rozpustné nejsou – brání slepování kapiček monomerů a již vznikajících makromolekul. Do reakční směsi se proto často přidává fosforečnan vápenatý, který je ve vodě téměř nerozpustný (součin rozpustnosti $1 \cdot 10^{-26}$).

4.2. Výroba zpěnovatelného polystyrenu

Jde o suspenzní polymeraci, která probíhá v přítomnosti těkavého uhlovodíku pentanu. Ten je rozpustný ve styrenu, ale nerozpustný v polystyrenu.^[7]

Jedním z největších výrobců zpěnovatelného polystyrenu v Evropě je společnost SYNTHOS a.s., která má jednu ze svých fabrik v Kralupech nad Vltavou. Pod obchodním názvem KOPLÉN[®] vyrábí EPS, který se dále používá hlavně na výrobu izolačních desek, protihlukových desek ale také v obalovém průmyslu. Dalšími výrobci EPS působícími

v České Republice jsou například firmy Styrotrade a.s., Isover, Baunit, Enroll CZ spol. s.r.o. a Izopol Dvořák s.r.o.^[11]

Výroba EPS v Synthos Kralupy a.s.

Celý proces výroby, a to nejen v Kralupech nad Vltavou, se dá rozdělit do tří stupňů - předpolymerace, stabilizace a tlaková polymerace. Nejprve je nestabilizovaná disperze styrenu ve vodě polymerována do přibližně poloviční konverze při teplotě 80 až 90 °C. Aby se docílilo nízkého obsahu zbytkového styrenu, obohacuje se suspenze směsí organických peroxidů. Poté je suspenze stabilizována vodným roztokem polyvinylalkoholu, který zabraňuje slepování kuliček a zajišťuje úzkou distribuci jejich velikosti. Následně se nadávkuje pentan a nechá se proběhnout tlaková polymerace, při které se zvyšuje teplota i tlak z 85 °C a tlaku 0,5 MPa až na 115 °C a 0,85 MPa. Obsah reaktoru je poté ochlazen a zbytkový plyn vypuštěn. Produkt ve formě miniaturních kuliček je přetlačen přes filtrační koš, následně odstředěn a dosušen při teplotě, která by neměla převyšovat 50 °C.^[7]

4.3. Zpracování zpěňovatelného polystyrenu

Polystyren je připraven ve formě drobných kuliček o velikosti 0,3-2,8 mm, které obsahují pentan jako nadouvadlo. Prvním krokem, tzv. předpěnování, je zbytnění kuliček v komoře, kde jsou zahřívány nad teplotu T_m (nad 90 °C), čehož lze dosáhnout vodní parou, ale i vroucí vodou. Těkvavý pentan při této teplotě uniká z kuliček ven a vytváří tak malé dutinky, které jsou ihned vyplněny vzduchem. To má za následek nafouknutí perel až na padesátinásobek původního objemu. Výsledná objemová hmotnost se pohybuje mezi 10 až 35 kg/m³ a dá se ovlivnit především dobou působení vysoké teploty na perly. Poté se lehčený polystyren nechává "dozrát". Jedná se o meziuskładnění perel v provzdušňovacích silech, kde zbytkový pentan unikne do okolí a perly se současně vysuší. Expandované kuličky jsou zde chlazeny a vytváří se v nich podtlak, který může způsobovat velkou citlivost materiálu na mechanické poškození. Podtlak je však vyrovnáván difuzí vzduchu do kuliček a tím se dosahuje lepší mechanické pružnosti. Takto vyrobený polystyren je připraven na poslední fázi, kterou je dopěnění (ve formě). Perle mohou být nyní různými způsoby zpracovány na konečné výrobky:^[12]

- a) výroba bloků pro výrobu desek
(tepelně izolační, drenážní, elastifikované proti hluku)
- b) výroba jednotlivých tvarovek pomocí automatů na výrobu tvarovaných dílců
(perimetr, obaly)
- c) nekonečná výroba na pásových zařízeních

Znázornění celého zpracovatelského postupu je na obrázku 3.

Nejčastější je výroba bloků, která má velký význam pro stavební izolace. Forma má tvar kvádra a je vybavena parními tryskami, kterými je dopravována vodní pára ke kuličkám.

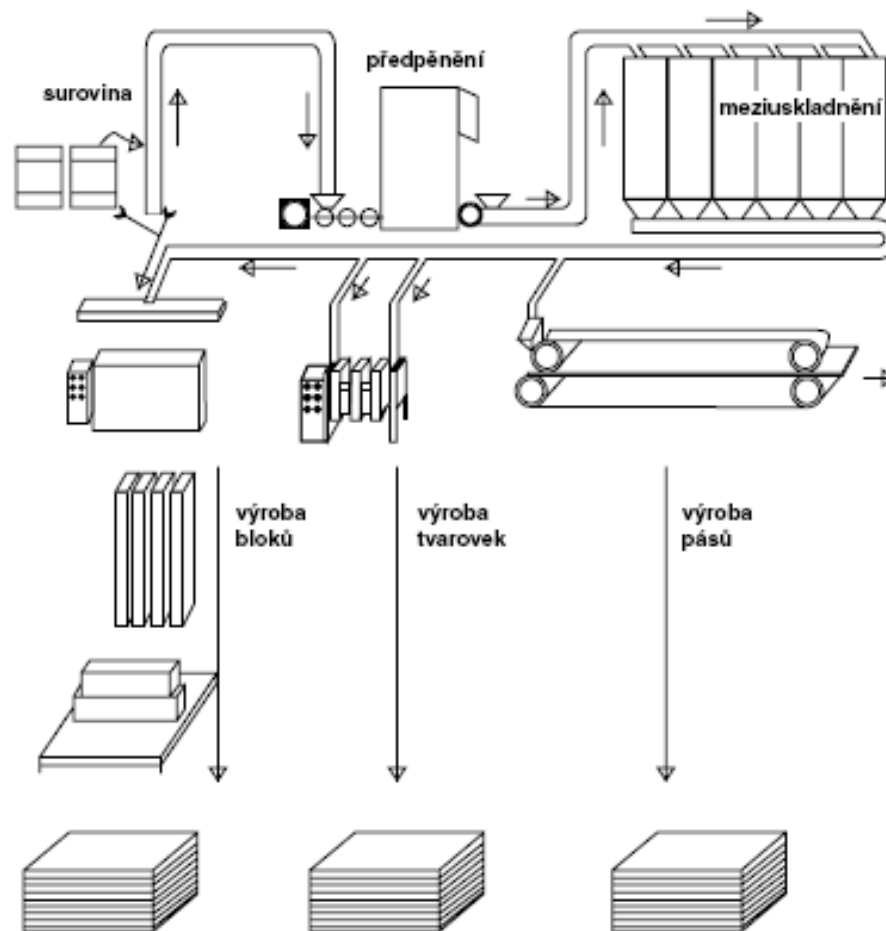
Působením páry se kuličky nafouknou a změkknou. Jelikož jsou expandovány v uzavřeném prostoru, není možnost objem sypké směsi dále zvětšovat a tak dochází k jejich slepení a svaření. Po několika minutách je zastaven přívod vodní páry a obsah formy se nechá nějakou chvíli chladnout. Dostáváme tak celistvý blok, který je vyndán z formy a uskladněn. Tyto kvádry mají obrovské rozměry a mohou být vysoké i 5 metrů. Ve výrobě je proto potřeba používat upravené vysokozdvížené vozíky, které jsou pro úchyt bloků vybaveny postranními rameny a zároveň je důležité zabezpečit dostatečný prostor pro skladování v hale.

Ze skladu jsou kvádry odváděny na řezání. To se provádí teplým odporovým drátem, který při řezání osciluje, čímž se dosáhne velmi dobrých rozměrových tolerancí. Jednotlivé řezací dráty jsou podle tloušťky vyráběných desek roboticky nastaveny, což umožňuje rychle změnit sortiment různě tlustých desek podle aktuální zakázky. Nejprve ze všeho se však musí ořezat několik cm po stranách celého kvádrů, protože má z formy na povrchu nerovnosti.

Bloky sloužící k tlumení zvuku se po nařezání vkládají do lisu a jsou stlačovány na třetinu původní tloušťky. Materiál se po uvolnění zvolna vrací na 4/5 svého původního rozměru. Tyto strukturně narušené polystyreny mají dobré akustické tlumivé vlastnosti. Nařezávají se na desky a používají se především do plovoucích podlah.^[12]

V případě tvarovek je proces dopěňování de facto stejný jako u bloků, jediný rozdíl je v tom, že forma má tvar požadovaného výrobku a nemusí se dále nařezávat. To se využívá například pro vytvoření zákrutů, výstupků nebo úložišť pro různé trubky, např. topení. Další aplikace tvarovek je vytváření obalových částí. To mohou být například polystyrenové výstelky v krabicích prodávaných televizí apod. Díky tomu, že jsou výrobky nenařezávané, mají uzavřenější strukturu povrchu a tím pádem nižší nasákavost.^[12]

Poslední možností zpracování EPS je kontinuální výroba na páse. Kuličky EPS jsou dopěňovány mezi dvěma pásy, ze kterých vychází desky řezané na příslušnou délku.



Obrázek 3 ^[12]

4.4. Expandovaný polystyren EPS

EPS se používá v několika variantách, které se liší v menší míře součinitelem tepelné vodivosti λ , v míře větší pak faktorem difuzního odporu μ a v objemové hmotnosti ρ . Z hlediska hořlavosti se všechny tyto typy řadí do kategorie E, což je nevýhodou. Základní rozdělení je následující:

- Bílé EPS desky
- Šedé grafitové EPS desky
- Perimetr
- Volný EPS foukaný do dutin

4.4.1. Pevnost EPS

Za zkratkou EPS se uvádí číslo, které vyjadřuje jeho minimální napětí v jednotkách kPa při 10% stlačení polystyrenové desky. Vyrábí se v rozmezích od EPS 50 po EPS 200, nicméně ve stavbách se nejčastěji používají EPS 70 až 150. Čím větší zátěž bude působit na místo, které

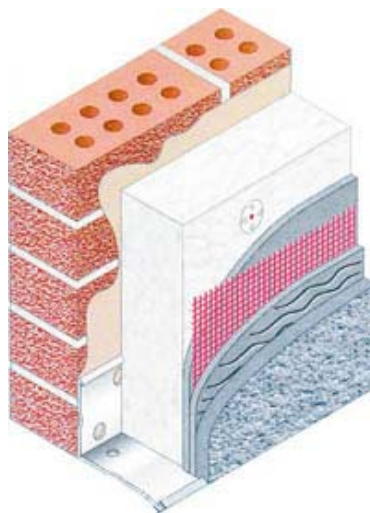
chceme pomocí EPS izolovat, tím vyšší číslo budeme volit. Pokud nám ale na pevnosti izolačního materiálu velmi záleží, budeme volit jinou formu PS izolace - extrudovaný polystyren. Za číslem je dále uvedeno písmeno F pokud se jedná o fasádní izolace, nebo EF pokud se jedná o elastifikovaný typ používaný v systémech ETICS popsanych níže. Dříve bylo možné setkat se s označením EPS Z a EPS S, což znamenalo polystyren základní a stabilizovaný, nicméně od roku 2015 není EPS takto dále rozdělován, protože se vyrábí pouze stabilizovaný. Současné značení jednotlivých druhů EPS izolací popisuje tabulka 5.^[13]

Původní značení	Nové značení	Barevný kód			Poznámka
EPS 50 Z	EPS S				bez zatížení – výplňový materiál
EPS 70 Z EPS 70 S	EPS 70				základní typy, které nahrazují původní Z a S typy
EPS 100 Z EPS 100 S	EPS 100				
EPS 150 Z EPS 150 S	EPS 150				
EPS 200 Z EPS 200 S	EPS 200				
EPS 70 F EPS 100 F –	EPS 70 F EPS 100 F EPS EF				
EPS P	EPS P	neznačí se			nižší nasákavost
EPS T	EPS T				podlahový typ tlumící kročejový hluk

Tabulka 5 ^[13]

4.4.2. Systémy ETICS

Zkratka ETICS se používá pro vnější zateplovací systémy používané na svislé konstrukce a je odvozena z anglických slov External thermal insulation composite systems. Jedná se o kompozit, jehož základem jsou desky z EPS nebo minerální vlny, které jsou lepeny na obvodové stěny kombinací lepicí a stěrkové hmoty a ukotveny nejčastěji plastovými hmoždinkami. Dále se na tuto plochu nanáší další vrstva lepicí a stěrkové hmoty vyztužená sítí a poslední vrstvou je omítka. Celá stavba kompozitu je znázorněna na obrázku 4.^[14]

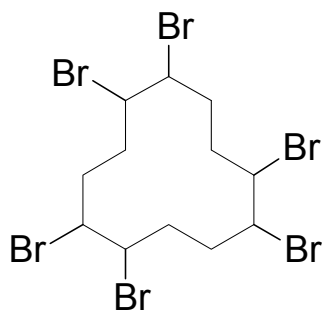


Obrázek 4 ^[14]

4.4.3. Hořlavost EPS

Pokud bychom chtěli dosáhnout nehořlavosti EPS, musela by koncentrace retardérů spolu s dalšími synergicky působícími látkami překročit 10%, což je pro stavební aplikace nemožné. Vyrábí se tedy samozhášivý zpěňovatelný polystyren, který se ale i přes přítomnost zhášedel řadí do E-třídy hořlavosti. Samozhášivost znamená přítomnost zhášedel v menší koncentraci (okolo 1%) zajišťující ukončení hoření po odstranění plamene. V případě polystyrenů se používají bromovaná zhášedla v koncentracích do 0,7% odolávající zdrojům hoření do 25 kW/m². Po překročení 50 kW/m² již přítomnost retardéru nehraje roli a EPS pak hoří stejně, jako kdyby ho neobsahoval.^[15]

Retardace hoření probíhá tak, že vzniklý bromovodík HBr reaguje s produkty hoření, kterými jsou radikály HO· a H· a které podporují řetězovou reakci hoření. V polovině minulého století se jako zhášedlo používal tetrabromxylen *TBX*, později byl na VŠCHT v Praze objeven také 1,2,5,6-tetrabrom-cyklooktan. Nejvíce se však uplatňoval hexabromcyklododekan se zkratkou *HBCD* (chemická struktura na obrázku 5).^[15]

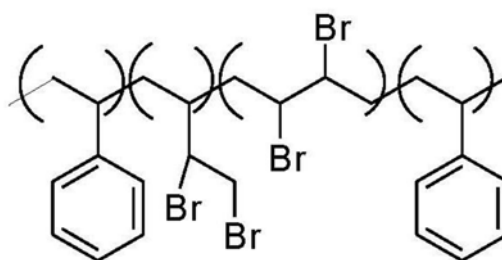


Obrázek 5 – HBCD ^[15]

Tato látka spadá do kategorie látek s PBT vlastnostmi, což jsou persistence, bioakumulace a toxicita. Je to tedy látka, která dokáže přetrvat dlouhou dobu v životním prostředí, může se hromadit v tělech zvířat a lidí a zpomaluje činnost některých detoxikačních enzymů. Podle

Stockholmské úmluvy z roku 2013 by se tento retardér neměl vyrábět ani používat, přičemž platila výjimka do roku 2019 pro podniky vyrábějící EPS a XPS pro stavební účely, aby měly čas přejít na alternativní zhašedla.

V roce 2011 bylo americkou firmou Dow oznámeno vyvinutí nového vysoce molekulárního retardéru s názvem PolymericFR, který funguje právě jako bezpečná netoxická náhrada za HBCD.^[15]



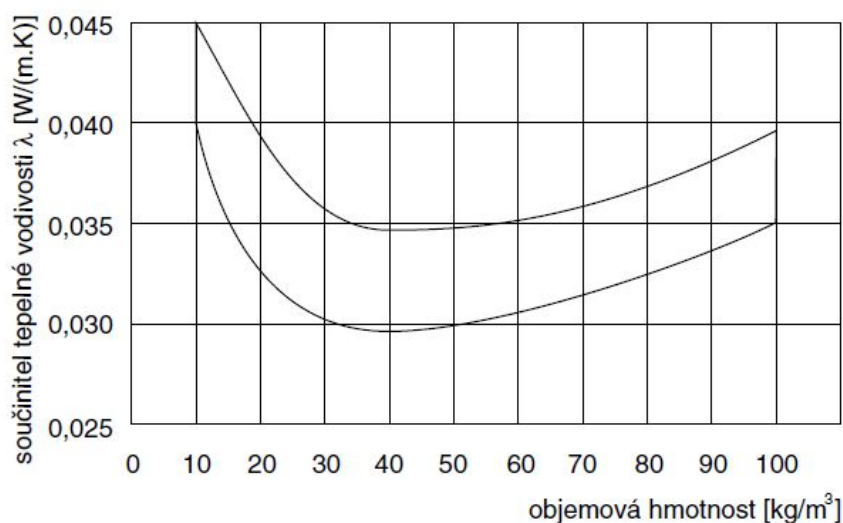
Obrázek 6 – PolymericFR, náhrada za HBCD ^[15]

4.4.4. Bílý EPS a jeho vlastnosti

Mezi největší výhody bílých EPS desek patří jejich snadná opracovatelnost, nízká hmotnost a nízká hodnota tepelné vodivosti.

Tepelná vodivost

Tento typ izolace je již desítky let využíváný hlavně díky nízké hodnotě součinitele tepelné vodivosti λ , který se pohybuje v rozmezí od 0,030 do 0,045 W/mK v závislosti na objemové hmotnosti, neboli hustotě. Nejlepší tepelně-izolační vlastnosti má v intervalu 30 až 50 kg/m³, a protože se vyrábí v hustotách od 8 do 40 kg/m³, můžeme tvrdit, že se vzrůstající objemovou hmotností součinitel λ klesá. Závislost λ na hustotě materiálu EPS je na následujícím grafu.^[12]



Obrázek 7 – graf závislosti λ na ρ ^[12]

Tepelná vodivost je u pěnových materiálů ovlivněna vodivostí polymeru tvořícího pevnou složku pěny, propustností pěny pro tepelné záření a především vodivostí plynu obsaženého v pění. EPS obsahuje asi 98 obj. % vzduchu, který plní izolační funkci a tyto tepelně-izolační vlastnosti se s časem nezhoršují.

Nasákavost a difuze páry

EPS má uzavřenou strukturu a samozřejmě není rozpustný ve vodě, a proto kapalná voda nepředstavuje riziko zhoršení izolačních vlastností, neboť se do struktury pěny téměř vůbec nemůže dostat. Nasákavost se po ponoření EPS do vody po 30 dnech ustálí na hodnotě maximálně 5 obj. % a dále již nenarůstá.^[12] V případě vodní páry se jedná o poměrně dobrou difuzi, jejíž rychlost je dána difuzní tloušťkou, která se vypočítá podle vzorce $s_d = \mu \cdot d$ (viz kapitola Základní pojmy). Hodnoty faktorů difuzního odporu se pohybují v rozmezí od 20 do 100 a jsou opět závislé na objemové hmotnosti.

Stárnutí EPS

EPS desky jsou i po 50 letech v dobrém stavu beze změn svých vlastností. Pokud je polystyren vystaven delší dobu UV záření, tak začíná degradovat, což se projevuje žloutnutím na povrchu. Nutno však dodat, že EPS izolace ve stavebnictví se vždy nachází uvnitř konstrukce, často jsou i součástí kompozitového systému (ETICS), a jsou opatřeny krycími vrstvami, což tuto degradaci eliminuje. Velkou výhodou EPS je fakt, že se v něm nedaří mikroorganismům, takže materiál nehnije a neplesniví. Bohužel je tento materiál měkký, takže ho často prožírají hlodavci a vytvářejí si v něm cestičky. Je proto dobré tyto izolace chránit pomocí nějakého obložení.

Chemická odolnost

EPS odolává dešťové i mořské vodě a také vodným roztokům zásad jako je například sodný nebo draselný louh. Odolává také silným anorganickým kyselinám jako je dusičná (do 50%) a sírová (do 95%) a bez problémů odolává všem hmotám, které se ve stavebnictví běžně používají, např. sádře, vápnu a cementu. Horší odolnost vykazuje při kontaktu s parafinovými oleji nebo motorovou naftou, protože při vystavení těmito látkám po delší dobu se může smršťovat. Polystyren neodolává organickým rozpouštědlům, jako je aceton, benzen, ether, ředidla do laků, benzín apod. a je v těchto látkách rozpustný.^[12]

4.4.5. Šedé grafitové EPS desky

Šedý EPS bývá také někdy označován jako Neopor. Plynná fáze je v případě bílých i šedých EPS desek stejná a v obou případech se jedná o vzduch. Pevná fáze se však liší, neboť v šedých deskách je přítomen grafit v podobě jemně rozemletého prášku. Tato technologie byla vyvinuta začátkem tohoto tisíciletí koncernem BASF s cílem omezit složku tepelné energie, která se v EPS deskách šíří sáláním. Bílé EPS desky dobře propouštěly tepelné elektromagnetické záření o vlnové délce okolo 10 μm a proto se hledal způsob, jak tyto vlny

při cestě izolantem absorbovat. Grafit je rozemlet do nanometrových rozměrů a je rovnoměrně rozptýlen v EPS tak, aby vzdálenost grafitových částic nepřekračovala 10 μm a zároveň se výrazně nezměnila hustota materiálu. Důležité však je, aby se grafitové částice nedotýkaly a tím nevznikala vodivostní mříž. Přídavek grafitu má za následek snížení součinitele tepelné vodivosti na hodnoty $\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$ při hustotě 15 kg/m^3 , což je hodnota, kterou klasický bílý EPS dosahuje až při hustotě 35 kg/m^3 .^[16] Z hlediska izolačních schopností je na tom tedy šedý typ o něco lépe, nicméně jsou tu ještě další rozdílné vlastnosti. Šedý polystyren má totiž větší teplotní roztažnost a je velmi citlivý na působení přímého slunečního svitu. Grafitové EPS desky měly na přímém slunci až 7krát větší prodloužení než bílé, což může znamenat problém při lepení této izolace na fasády. Při lepení desek na fasádu je nutné dodržet správný postup a zavěsit před stavbu (na lešení) ochranou síť, která zamezí působení přímého slunce na EPS šedé desky. Je také důležité dbát na správné skladování šedých EPS a nenechávat je zabalené v průhledných fóliích, pod kterými by se v důsledku skleníkového efektu vytvářelo velké teplo. Pro skladování šedých desek EPS platí, že by neměly být vystaveny dlouhodobě teplotě převyšující 70 $^{\circ}\text{C}$.^[17]

4.4.6. Perimetr

Desky perimetr se vyznačují nízkou nasákavostí a vysokou pevností v tlaku. Součinitel teplotní vodivosti má hodnotu $\lambda = 0,034 \text{ W/mK}$. Používá se hlavně v konstrukcích, které jsou vystavené vysokému zatížení nebo tam, kde očekáváme vyšší vlhkost.

4.5. Extrudovaný polystyren XPS

4.5.1. Výroba XPS

Tento typ polystyrenové izolace je vyráběn vytlačováním (extruzí) a používáme pro něj zkratku XPS. Polystyren s vysokým podílem uspořádané krystalické struktury se nejprve mísí spolu s dalšími přísadami, především retardéry hoření a pigmenty. Jejich podíl je kontrolován v dávkovacím kontejneru. Tato směs pak postupuje do plastifikační zóny extruderu, kde je vysoká teplota i tlak, což způsobí roztavení směsi. Teplota se zde pohybuje okolo 200 $^{\circ}\text{C}$. V určitém místě extruderu – za zónou plastifikace – je přívod nadouvadla. Jako nadouvací látky se používají takové, které se rychle a rovnoměrně rozpouští v polystyrenu a zároveň mají velký nadouvací efekt. To může být např. ethanol nebo oxid uhličitý. Pro nadouvání se také používají částečně fluorované uhlovodíky HFC, jejichž používání se ale omezuje, protože patří do kategorie skleníkových plynů přispívajících k oteplování planety. Horká viskózní tavenina je poté protlačována extruderem přes matici ven, kde je atmosferický tlak. Právě rozdíl tlaků způsobuje napěnění polystyrenové taveniny, která narůstá do několikanásobku svého původního objemu. Výsledkem tohoto kontinuálního procesu je dlouhý pás vypěněného polystyrenu, který se dále dotvaruje tlakem tak, aby měl rovnou stěnu (neboť z

extruderu vyjíždí pás na povrchu trochu zaoblený). Po dotvarování je po stranách nařezávám tak, aby měl po celé délce stejnou šíři. Na konci linky je nůž, který nasekává pás na panely podle nastavené délky. Celý tento proces je plně automatizován, nicméně u linky je vždy několik kontrolních stanovišť, kde se ověřuje tloušťka pásu nebo případné lokální povrchové závady. Posledním krokem před balením a uskladněním může být chlazení jednotlivých XPS panelů na rotačním chladícím zařízení páternosterového typu.^{[18][19]}

4.5.2. Vlastnosti a použití XPS

Díky způsobu výroby má extrudovaný PS některé fyzikální vlastnosti lepší než expandovaný.

Nenasákavost

Hlavním rozdílem je nenasákavost XPS, což je přímý důsledek jeho celistvé uzavřené struktury na povrchu. Tato vlastnost se ale značně zhoršuje, pokud jsou desky nařezány – je tak porušen jejich povrch z výroby. Proto se doporučuje desky rozměrově upravovat pouze pokud je to opravdu nutné.^[20] Dlouhodobá nasákavost poté nepřekročí hodnotu 0,7 %.^[21] Pokud se podíváme na nasákavost EPS, tak ta dosahuje maximální nasákavosti přibližně 5 %.

Tepelná vodivost

Výrobce Austrotherm u výrobku XPS TOP P GK uvádí hodnotu součinitele tepelné vodivosti $\lambda = 0,037$ W/mK při tloušťce 50–80 mm a $\lambda = 0,039$ při tloušťce 90–100 mm.^[22] Výrobce Isover u produktu Styrodur 3000 CS uvádí hodnoty 0,033 W/mK.^[23] Je dobré si uvědomit, že tepelná vodivost XPS desky závisí hlavně na vodivosti plynu použitého při napěňování.

Pevnost

Extrudovaný polystyren vykazuje velmi dobrou pevnost v tlaku, která dosahuje hodnot až 300 kPa při 10% stlačení. Je proto vhodný pro izolace zatěžových podlah. Výrobce izolačních materiálů URSA uvádí hodnoty 200 kPa při tloušťce 30–40 mm a 300 kPa při tloušťkách 50–160 mm.^[21]

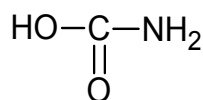
Hořlavost - expandovaný polystyren je hořlavý a řadí se do skupiny hořlavosti E. To znamená, že odolá jen malému plameni a to pouze na krátkou dobu.

Použití

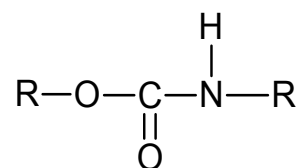
Díky téměř nulové nasákavosti a velké pevnosti se používá pro izolace spodních částí staveb. Navíc je tento materiál odolný proti hmyzu a hlodavcům, což je u izolací, které jsou v kontaktu se zemí velká výhoda. Jedná se tedy především o zateplení soklů, kde se po dešti nebo po rozmrznutí sněhu a ledu hromadí voda. V případě zateplování sklepů by se měla XPS deska dostat až do nezamrzavé hloubky, což je přibližně 80 cm pod zemí, a proto se velice hodí odolnost proti zemině. Další možné využití je samozřejmě také izolace garáží, suterénních místností ale i plochých střeš.

5. Polyuretanové izolace

Polyuretany dnes patří mezi desítku nejčastěji vyráběných polymerních materiálů. Používáme pro ně označení PUR a v recyklačním symbolu je značíme číslem 7 (ostatní). Jedná se o rozsáhlou skupinu polymerních látek, která má velmi rozmanitou paletu vlastností. Z chemického hlediska se jedná o polyesteramidy, neboť ve své struktuře obsahují kombinaci vazby polyesterů a polyamidů. Tuto vazbu označujeme za urethanovou, nebo také karbamátovou. Estery kyseliny karbamové (např. ethylkarbamát) byly totiž dříve označovány za uretany, a proto se dnes pro tuto vazbu používá označení "uretanová".



Obrázek 8 – kyselina karbamová



Obrázek 9 – uretanová (karmamátová) vazba

Historie polyuretanů sahá až do doby před druhou světovou válkou. Výzkum se odehrával ve firmě IG Farben ve Spolkové republice Německo. Skupina výzkumníků, kterou vedl Otto Bayer, objevila polyadiční reakci alifatických diizokyanátů a polyolů, při které vznikaly lineární polyuretany s vysokou molekulovou hmotností. Patentová práva pocházejí z roku 1937, ale teprve v padesátých letech začal velký rozvoj polyuretanových materiálů. V té době se pro výrobu začaly používat nové typy polyolů na bázi polyetherů.^[24]

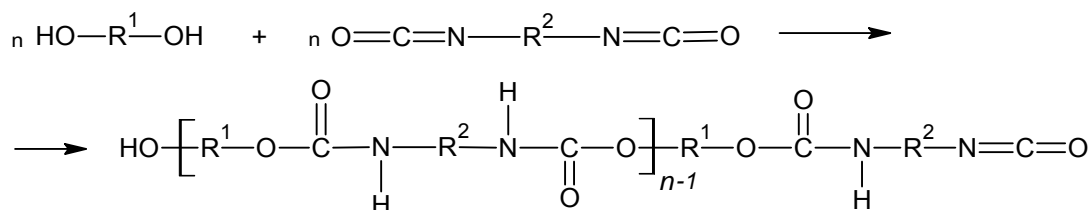
I přes to, že škála vlastností PUR je díky jejich rozmanitým možnostem chemické struktury široká, mají polyuretany některé základní vlastnosti společné. Jedná se hlavně o velmi dobrou oděruvzdornost, skvělou adhezi k většině materiálů a chemickou odolnost ve vodném prostředí, kde odolávají zředěným roztokům kyselin i zásad.^[25]

Z hlediska izolací používaných ve stavebnictví se jedná o polyuretanové pěny, které mohou být jak měkké, tak tvrdé. Dále se z polyuretanů vyrábí elastomery, těsnění, barvy a lepidla.

5.1. Výroba polyuretanů obecně

PUR jsou vyráběny polyadící vícefunkčních isokyanátů s dvojfunkčními nebo vícefunkčními alkoholy. Podle volby monomerů můžeme ovlivnit, zda výsledný polymer bude lineární, nebo síťovaný. Pokud zvolíme diisokyanát a dvojfunkční alkohol, očekáváme vznik lineární makromolekuly. Způsoby větvení a následného sesíťování jsou vysvětleny v následující podkapitole o reakcích isokyanátové skupiny. Pro výrobu PUR se většinou nepoužívají nízkomolekulární alkoholy, nýbrž polyoly, což jsou delší řetězce mající na koncích hydroxylové skupiny a jedná se především o polyoly na bázi polyéterů nebo polyesterů.

Jako reakce vzniku lineárního polyuretanu se často uvádí polyadiční reakce diisokyanátu s dvojfunkčním alkoholem (polyolem). Obecné schéma reakce je popsáno následující rovnicí 3:

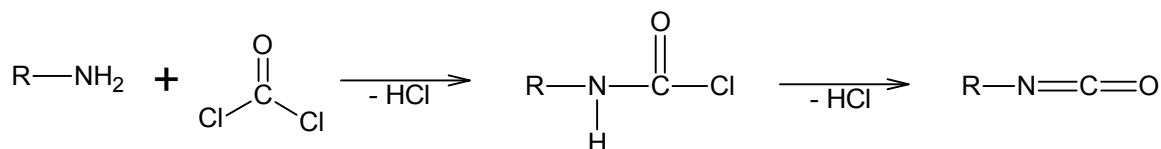


Rovnice 3

5.1.1. Isokyanáty, vznik a jejich reaktivita

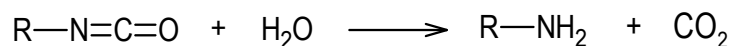
Isokyanáty jsou velmi reaktivní sloučeniny. Jsou považovány za látky nebezpečné pro živé tkáně a vyvolávají silná podráždění očí, kůže a dýchacích cest. Jsou to silné plicní senzibilizátory, které mohou způsobit bronchospasmus (zúžení průdušek). Neexistují dostatečné důkazy o karcinogenitě u lidí, nicméně existují dostatečné důkazy u pokusných zvířat, takže tyto látky řadíme do skupiny 2B - pravděpodobná karcinogenita pro člověka.^[26] Při manipulaci s těmito látkami je proto zapotřebí dodržovat zásady bezpečnosti.

Většina isokyanátů, které se dále používají pro výrobu PUR, se připravuje fosgenací primárních aminů, což popisuje následující rovnice 4:



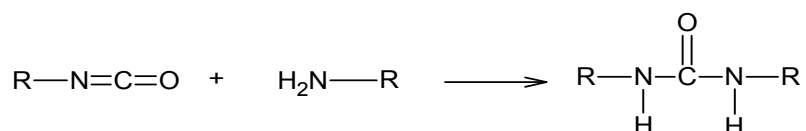
Rovnice 4

Isokyanáty reagují velmi dobře se sloučeninami obsahující aktivní vodík, což jsou například alkoholy, karboxylové kyseliny, aminy nebo voda. Reakce s alkoholy je popsána ve výše uvedené rovnici 3. Pokud však isokyanátová skupina reaguje s vodou, dojde ke vzniku primárního aminu a zároveň uvolnění CO₂, který plní funkci nadouvadla (rovnice 5).^[27] Tvorba oxidu uhličitého je důležitá při výrobě polyuretanových pěn, které mají využití právě ve stavebnictví jako izolační materiály.



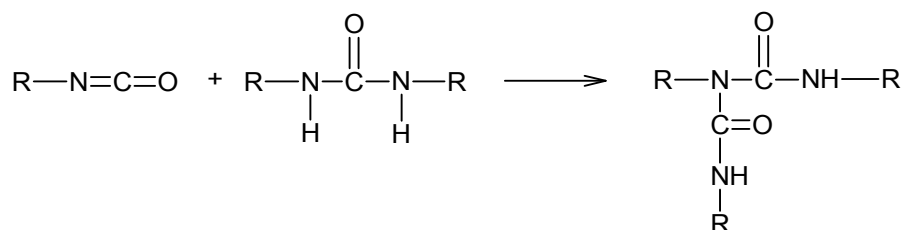
Rovnice 5

Izokyanáty mohou také reagovat s primárním aminem. Poté vzniká tzv. substituovaná močovina, viz rovnice 6.

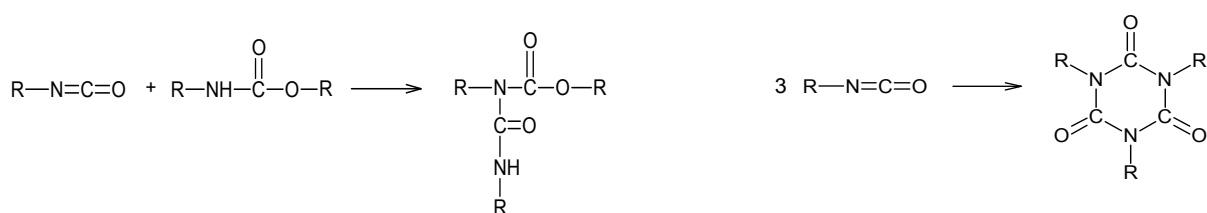


Rovnice 6

Pokud usilujeme o vytvoření sesíťovaného polyuretanu, bude potřeba vytvořit biuretovou nebo allofanatovou vazbu. Tyto vazby totiž vytvoří větvení řetězce, které nakonec vede k sesíťení. V případě vzniku biuretové vazby reaguje isokyanátová skupina se substituovanou močovinou (rovnice 7). Větvící vazbu allofanátovou získáme spojením isokyanátové skupiny a uretanové skupiny (rovnice 8). Další možností rozvětňování polyuretanových molekul je vytváření trimeru isokyanátových skupin (rovnice 9), což souvisí více s polyisokyanuráty.^[27]



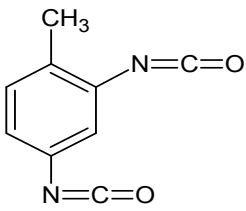
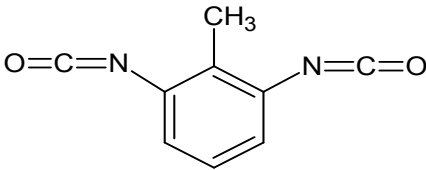
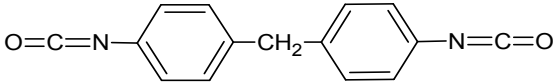
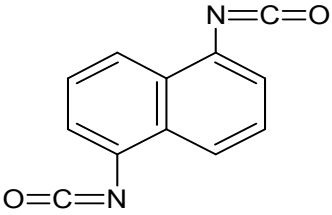
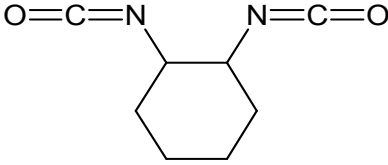
Rovnice 7



Rovnice 8

Rovnice 9

Používanější diisokyanáty při výrobě polyuretanů jsou aromatické. Oproti alifatickým vykazují větší reaktivitu a také jsou levnější. Na druhou stranu, nevýhodou aromatických diisokyanátů je žloutnutí produktů vlivem světla. Alifatické a cykloalifatické diisokyanáty na světle nežloutnou - např. 1,6-diisokyanatohexan.^[28]

2,4-diisokyanatotoluen 	2,6-diisokyanatotoluen 
4,4-diisokyanatodifenylmethan 	
1,5-diisokyanatonaftalen 	1,6-diisokyanatohexan 

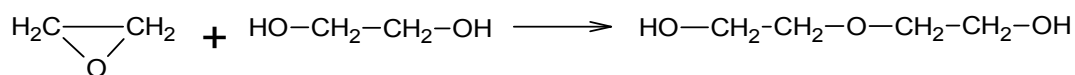
Tabulka 6 – časté monomery diisokyanátů

Velmi často se používají monomery uvedené v tabulce 6, ze kterých jsou nejpoužívanější diisokyanatotolueny, pro které používáme zkratku TDI, a diisokyanatodifenylmethan se zkratkou MDI.

TDI se používá především pro výrobu měkkých pěn. Prodává se vždy v určitém podílu 2,4-izomerů a 2,6-izomerů, přičemž více je vždy 2,4-izomerů. Isokyanátová skupina v poloze 4 je o dost reaktivnější než v ostatních polohách a proto se TDI dá používat k odstupňované adiční reakci - tzn. k výrobě netěkavých předpolymerů. MDI se používá na výrobu polotvrdých a tvrdých pěn a elastomerů.^[28]

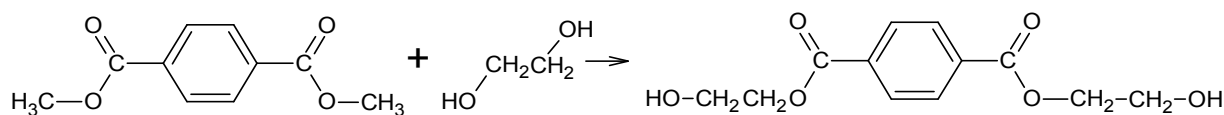
5.1.2. Polyoly

Pojmem polyoly rozumíme nízkomolekulární polymery, které mají na koncích -OH skupiny, takže je můžeme nazývat také jako polyhydroxosloučeniny. Polyetheralkoholy vznikají reakcí oxiranu, např. propylenoxidu nebo ethylenoxidu, s diolem. Mechanismus reakce je znázorněn v následující rovnici 10.



Rovnice 10

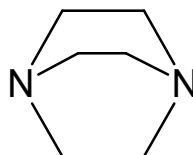
Polyesteralkoholy se dají připravit reakcí dikarboxylové kyseliny a přebytku diolu. Tento přebytek zajistí –OH skupiny na koncích řetězců. Pokud nahradíme diol vícefunkčním alkoholem, dostaneme rozvětvené makromolekuly. Reakce ethylenglykolu s methylesterem kyseliny tereftalové (rovnice 11) znázorňuje mechanismus vzniku polyesteralkoholů:



Rovnice 11

5.1.3. Katalyzátory

Při přípravě polyuretanových pěn se často používají katalyzátory, které velmi urychlují reakce diisokyanátových skupin. Díky katalyzátorům můžeme také ovlivnit růst lineárního řetězce nebo naopak míru sesítnění, dále také rychlost uvolňování CO₂. Nejběžnější jsou terciární aminy, například benzyldimethylamin, který je prodáván pod obchodním názvem Desmorapid DB firmy Bayer^[28]. Dále se používají látky jako např. tributylcínacetát, dibutylcínacetát nebo dibutylcínlaurát. Mimořádně účinný katalyzátor je 1,4-diazabicyklo[2,2,2]oktan, který má firemní označení DABCO (obrázek 10). Používá se například pro reakce polyetherů z propylenoxidu, které reagují s diisokyanáty pomaleji.^[28]



Obrázek 10 – 1,4-diazabicyklo[2,2,2]oktan DABCO

5.2. Výroba a vlastnosti lehčených polyuretanů

Nejširší uplatnění mají polyuretany právě ve formě lehčených hmot. Jedná se o materiály, které při reakci jejich vzniku uvolňují plyn, a ten způsobuje napěnění. Nedílnou součástí reakční směsi je tedy voda, neboť reakce vody s isokyanátovou skupinou dává vzniknout oxidu uhličitému a primárnímu aminu. Amin poté bez problému reaguje s ostatními isokyanátovými skupinami, přičemž vzniká močovinová vazba (viz rovnice 6). Tato vzniklá močovinová vazba stojí za vznikem vazeb biuretové a allofanatové, které postupně vytvářejí sesíťovanou polyuretanovou molekulu. Nadouvacím plynem nemusí být nutně jen CO₂, lze pro větší efekt přidávat inertní látky, jako jsou například freony. Freony však z pohledu životního prostředí představují velký problém, neboť mají nepříznivý vliv na ozonovou vrstvu v atmosféře. Bubliny plynu (nadouvadla) v polyuretanu rostou a mají kulový tvar, což se děje

do doby než má pěna objemovou hmotnost přibližně 250 kg/m^3 .^[24] Poté se bubliny začínají dotýkat, což vede k jejich částečné deformaci. Nakonec pěna zatuhne a výsledkem je systém buněk mající tvar mnohostěnu a velmi tenké stěny buněk, které tvoří pevnou fázi pěny.

Při vytváření polyuretanových pěn se nejčastěji používá dvousložkový systém. První složka obsahuje směs isokyanátů, obvykle je zabarvena do hněda. Druhá složka je směs polyolů, která navíc obsahuje nadouvadlo (nebo více nadouvadla), stabilizátory pění, pigmenty a dále například retardéry hoření.^[24]

5.2.1. Měkké PUR pěny

Měkké pěny se vyrábí především z toluendiisokyanátu a lineárních polyesterů kyseliny adipové a diethylenglykolu, lze ale použít i polypropylenglykoléter. Směs samozřejmě také obsahuje různá aditiva, retardéry hoření a katalizátory (DABCO). Isokyanátová složka by v reakční směsi neměla překročit 40 hmotnostních procent, protože je potřeba mezi uzly makromolekulární sítě zajistit přítomnost dlouhých a elastických řetězců. Tím se liší měkké pěny od pěn tvrdých, které mohou mít podíl isokyanátu až 70% a jsou tedy více sesítěné.^[28] Nejčastější metodou výroby tohoto materiálu je kontinuální jednostupňová výroba, kdy sesíťování a vznik nadouvadla CO_2 probíhá současně. Všechny reakční složky jsou společně míchány, dokud nevznikne kapalina o vysoké viskozitě, kterou následně lijeme do forem. Ve formách do dvou minut vypění a po několika dalších minutách je pěnový výrobek z formy vyjmut.^[28] Takto se vyrábí například i matrace a různé další části nábytku (gauče, polštáře a sedací soupravy).

Vedle jednostupňové metody se také používá dvoustupňová. V prvním stupni se směs polyolu a diisokyanátu nechá předpolymerovat a určitá část diisokyanátů nezreaguje. Voda se poté přidává v druhém stupni.

Vlastnosti izolačních měkkých PUR pěn

Mezi nejvýhodnější vlastnosti měkkých pěn patří jejich nízká objemová hmotnost, která se pohybuje v rozmezí od 15 do 70 kg/m^3 , nejčastěji se však setkáme s hodnotou okolo 25 kg/m^3 . Patří mezi výborné tepelné izolanty. Součinitel tepelné vodivosti je srovnatelný s polystyrenovými izolacemi a jeho hodnota se pohybuje v rozmezí od $0,030$ do $0,045 \text{ W/mK}$. Bloky měkkého polyuretanu se dobře opracovávají - dají se snadno řezat na desky nebo folie pomocí rozžhaveného drátu. Teplem se dají přilepit k mnoha druhům podkladů, např. dřevo, kovy i beton. Po delším vystavení UV záření polyuretanové výrobky žloutnou, ale ztráta technologických vlastností se vlivem záření příliš neprojevuje.^[29] Tyto pěny jsou bohužel nasákavé do přibližně 30 % své váhy. Proto je vhodné a někdy nutné opatřovat izolace parotěsnou folií, která zabraňuje možnosti kondenzace vodní páry uvnitř pěny. Hodnoty difuzního odporu u PUR pěn s otevřenými póry jsou tedy velmi nízké.

5.2.2. Tvrdé PUR pěny

Tvrdé pěny mají vyšší míru sesítení než měkké, čehož se dosahuje použitím diisokyanátu v přebytku, tedy přibližně 70 % hmotnosti reakční směsi. Dále se dá hustější síť makromolekuly zajistit větším počtem hydroxylových skupin. Jako isokyanátová složka se používá nejčastěji MDI (diisokyanatodifenylmethan).^[28]

Tvrdé pěny odolávají vodě, zředěným kyselinám, zásadám a také olejům. Naopak neodolávají organickým rozpouštědlům. Díky hustější síti makromolekul jsou tvrdé pěny difuzně uzavřené, to znamená, že jejich faktor difuzního odporu μ je vyšší než u měkkých pěn. Nasákavost je malá, za 24 hodin po ponoření je to maximálně 3 % vlastního objemu.^[29]

Můžeme je připravovat v otevřených nebo uzavřených formách a stejně jako u měkkých pěn může být postup jednostupňový nebo dvoustupňový. Tvrdé pěny se mohou aplikovat jak litím, tak stříkáním. Je možné pěny připravit v podstatě na místě. Stříkané tvrdé pěny se používají na tepelnou izolaci plochých střech, podkroví ale i podlah. Podle požadavků na mechanickou zátěž budeme volit mezi polotvrdou pěnou, která má objemovou hmotnost okolo 30 kg/m³ nebo tvrdou o hustotě 50 až 100 kg/m³. Vlastnosti pěn se podle hustoty poměrně liší, některé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7 ^[29]:

Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Součín tepelné vodivosti [W/mK]
30	0,18 – 0,24	0,20 – 0,25	0,022
50	0,30 – 0,50	0,40 – 0,60	—
100	0,80 – 1,20	1,10 – 1,50	0,031

Tabulka 7 ^[29]

Tvrdé PUR pěny se dají mísit s anorganickými prášky, což může být např. hliník, skelná moučka apod. Díky tomu se velmi zvyšuje objemová hmotnost, ale zároveň vzrůstá pevnost v tlaku na hodnoty 2 až 30 MPa.^[29]

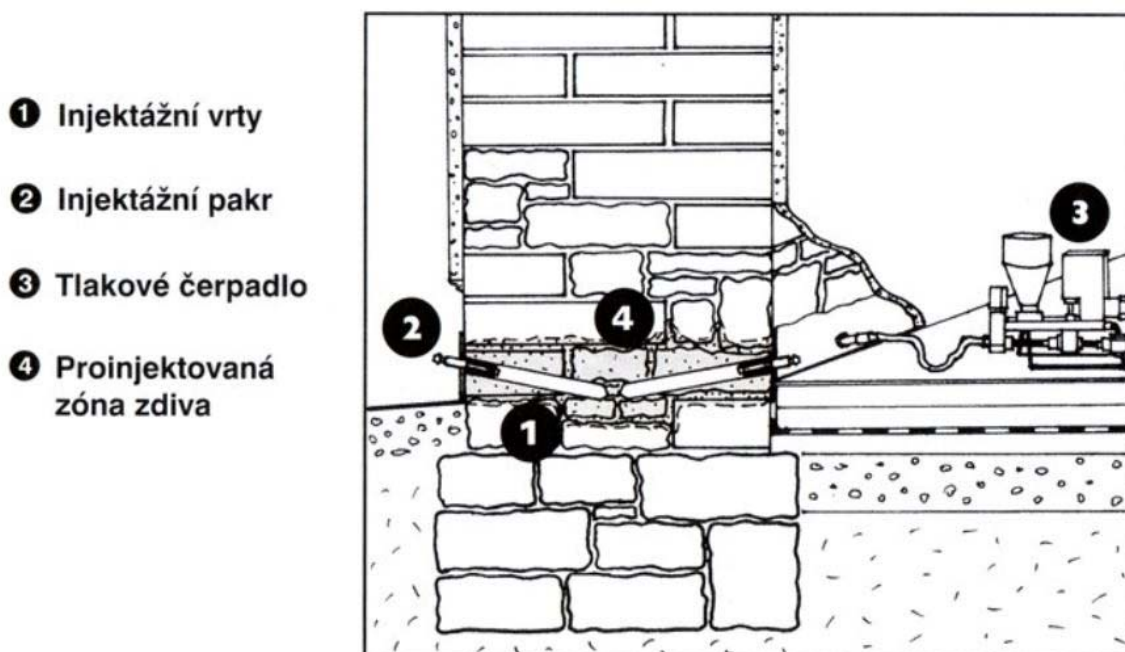
5.3. Základní způsoby zpracování PUR pěn

Způsoby jsou celkem 4 - volné lití, tlakové lití, injektáže a nástřik na místě.

Volné lití používáme, pokud chceme tepelně izolovat velký prostor a máme k dispozici velkou volnou plochu. Pro tuto metodu se volí pěny s nižšími objemovými hmotnostmi, tzn. do 40 kg/m³. Po nalití reakční směsi se zvyšuje reakční teplo, neboť reakce vzniku polyuretanů je exotermní. Aby vlivem reakčního tepla nedocházelo k deformaci pěny, nalévá se polyuretan po vrstvách. Dají se takto izolovat různé nádrže nebo zásobníky.

Tlakové lití je dávkování polyuretanových systémů do uzavřených forem. Stanovené množství polyuretanové směsi poté reaguje uvnitř formy, kde se vytváří CO₂ a čeká se na vypěnění. To může trvat deset minut až půl hodiny, závisí to především na reaktivitě použitých monomerů. Tato metoda je vhodná i pro pěny o vyšších objemových hmotnostech, až 250 kg/m³. Vyrábí se tak především tepelně-izolační panely pro sendvičové konstrukce.^[24]

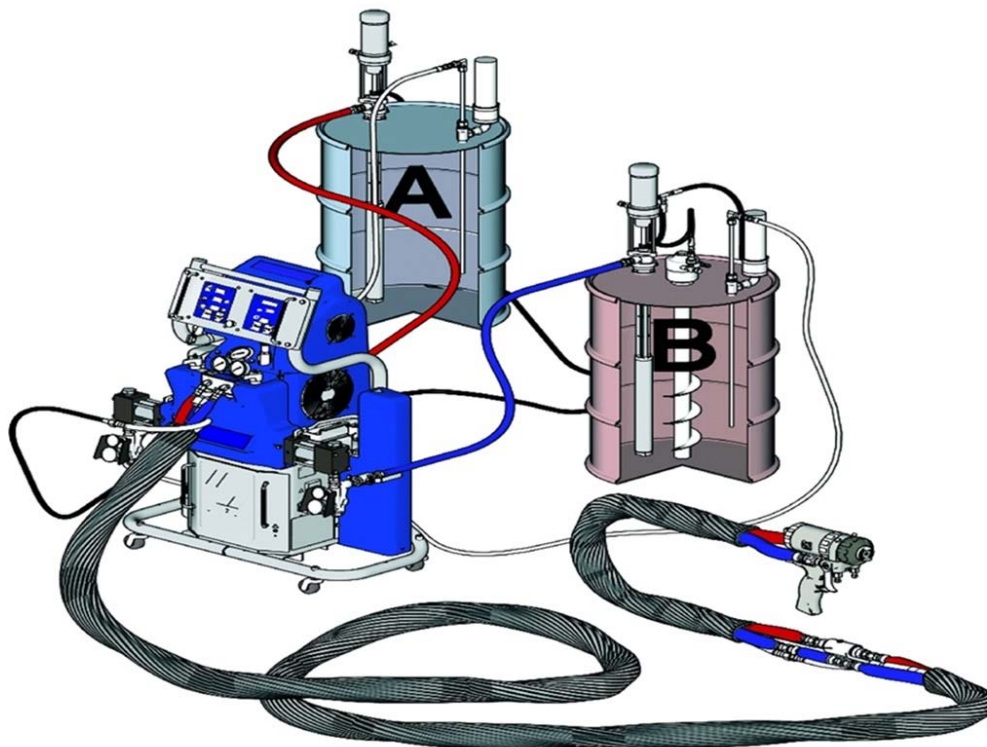
Injektáž je metoda zpevňování různých stavebních konstrukcí, např. tunelů a hrází – často se používá proti průniku tlakové vody. Vlhké zdivo obsahuje vodu, která reaguje s injektážním polyuretanem. Ten se uvnitř rozpíná a utěsňuje tak problematické místo. Proces injektáže je prováděn pomocí tlakového čerpadla a pakrů, které jsou od sebe v rozestupu 10 až 15 cm osazené do injektážních vrtů. Schéma provedení injektáže vlhké stěny popisuje obrázek 11^[30].



Obrázek 11^[30]

Nástřik polyuretanových pěn na místě je moderní metoda, díky které můžeme vytvořit celistvou izolační vrstvu PUR pěny doslova za několik sekund. Nutno podotknout, že je tato aplikace působivá, neboť pěna roste přímo před očima. Vysokotlakou směšovací pistolí je na podklad nastříkávána směs dvou kapalných složek A a B, které spolu ihned po nástřiku začínají reagovat. Na počátku reakce je směs ještě neztuhlá a lepivá a proto se velmi snadno nalepí na jakýkoli podklad. Po dobu několika sekund pěna narůstá ve svém objemu a tuhne. Za krátkou chvíli je celý proces hotový a pěna již není na dotek lepivá, ale dobře drží na povrchu, na který byla aplikována. Je to tedy metoda vhodná pro šikmé střechy, různě zakřivené a tvarově obtížné plochy. Velkou výhodou této aplikace je rychlost provedení. Navíc je izolační vrstva vytvořená nástřikem vodotěsná. Součinitel tepelné vodivosti má hodnotu v rozmezí od 0,030 do 0,045 W/mK.

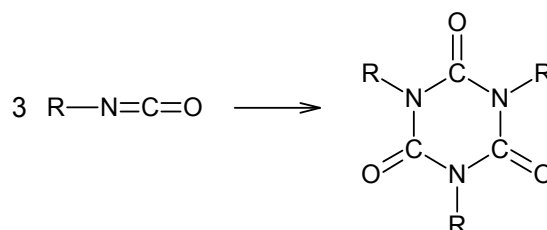
Člověk by měl však pamatovat na to, že manipuluje s nebezpečnými látkami, a proto je potřeba při nástřiku používat ochranný oděv a masku. Obrázek 12^[31] ilustruje zapojení nádrží se složkami (isokyanátu a polyolu) do zařízení sloužící pro nástřik PUR pěn (ale i polyuretanových elastomerů).

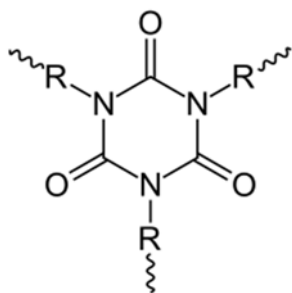


Obrázek 12^[31]

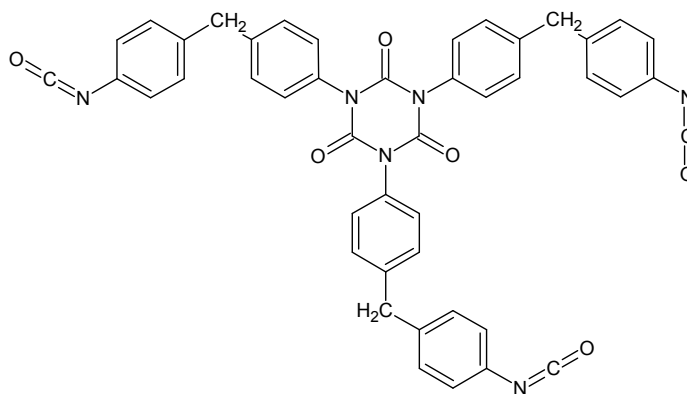
5.4. PIR - polyisokyanurát

Polyisokyanuráty vychází v měřeních jako jedny z nejúčinnějších tepelně izolačních materiálů z pohledu tepelné vodivosti. Hodnoty λ jsou velmi nízké - okolo 0,022 W/mK. (O něco menší hodnotu už mají jen fenolické pěny - viz další kapitola). Chemicky jsou to v podstatě vylepšené polyuretany a hlavní rozdíl je v míře sesítení makromolekuly, která je o dost větší než u polyuretanů. Na výrobu PIR se používá MDI (diisokyanatodifenylmethan) a polyoly - většinou se jedná o směs různých polyolů odvozených z polyesterů. Vyšším podílem MDI v reakční směsi je způsoben vznik trimerů tohoto isokyanátu. Struktura je znázorněna na následujících obrázcích a výše již byla popsána rovnicí 9.





Obrázek 13



Obrázek 14 – trimer vzniklý z MDI

Tyto struktury obecně nazýváme izokyanurátové. MDI reaguje při vyšší teplotě a v přítomnosti katalyzátorů nejprve sám se sebou a tvoří trimer – tedy triisokyanátový isokyanurát (jeho vzorec je na obrázku 14). Ten je v podstatě meziproduktem reakce. Zbýlý MDI a meziproductový trimer poté reagují s polyesteralkoholem a vytváří síť. Výsledný polymer je tedy tvořen jak isokyanurátovými, tak uretanovými vazbami. Pro vytvoření PIR pěny je nutné přidávat nadouvadlo a do směsi se samozřejmě přidávají i další látky jako např. retardéry hoření.

Vysoká hustota sesítní, pevné chemické vazby i přítomnost aromatických kruhů a isokyanurátových trimerů (kruhů) mají vliv na to, jaké má PIR konečné vlastnosti. V porovnání s PUR má kromě lepší hodnoty součinitele tepelné vodivosti také vyšší pevnost v tlaku, zvýšenou odolnost proti ohni a také vyšší stabilitu rozměrů. Ztuhlá PIR pěna má uzavřenou strukturu a má velmi malé buňky. Navlhavost polyisokyanurátových výrobků je velmi malá, jsou téměř nenavlhavé. Po měsíčním ponoření nabere pouze 2 % vlhkosti. Materiál navíc odolává velkým rozdílům teplot od $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pěny mají uzavřenou buněčnou strukturu, takže neabsorbují vzdušnou vlhkost. Oproti polyuretanům mají o něco lepší rozměrovou stabilitu. Pevnost při 10% stlačení, která je závislá na tloušťce PIR desky, se pohybuje v rozmezí od 120 do 150 kPa.

Chemická odolnost PIR pěn je dobrá, pro stavební průmysl dostačující. Jsou odolné při kontaktu se všemi stavebními materiály, tedy s vápnem, cementem, sádrovcem a odolají i kyselinám - HCl, H_2SO_4 a HNO_3 .

PIR se řadí mezi neshodně hořlavé materiály. Při hoření uhelnatí a z roztaveného polyisokyanurátu neodpadávají hořící kapky. V porovnání s klasickou PUR pěnou jsou na tom tedy lépe, neboť z PUR pěny při hoření odpadávají kapky roztavené hmoty. Při vysokých teplotách se však může z PIR uvolňovat kyanovodík HCN, který je velmi silným jedem, nebo také CH_3CN , který se na kyanovodík v těle rozkládá. ^[32]

Metody zpracování PIR pěn jsou stejné, jako výše uvedené způsoby zpracování polyuretanových pěn. Nejčastěji se však jedná o výrobu oboustranně kaširovaných panelů vypěňovaných ve formě, nebo o vyřezávání desek nebo různých tvarů z větších objemů PIR pěn. Vyřezávané výrobky jsou nejčastěji bez povrchové úpravy. Tyto materiály se mohou aplikovat stejně tak jako polyuretanové pěny nástřikem na místě. Vyrábí se ale především bloky, které jsou dále nařezávané na desky. Vyrábí se z nich různě široké izolační panely, které jsou často opatřené hliníkovou folií na povrchu. Využívají se na izolace plochých i šikmých střech, dále ve vzduchotechnice a při izolacích potrubí. Desky je možné spojovat i s jinými, méně častými polymerními izolacemi, jako je např. EPP (expandovaný polypropylen). Pěny se s oblibou používají při stavbě nízkoenergetických a pasivních domů.

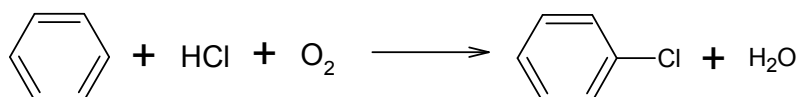
6. Pěněné fenoplasty

Jako fenoplasty označujeme fenolformaldehydové pryskyřice, které můžeme označovat zkratkou PF. Jak už název napovídá, vznikají reakcí fenolu nebo jeho derivátů s formaldehydem a tuto reakci z hlediska mechanismu řadíme do polykondenzačních reakcí. Jedná se o jedny z nejdéle známých syntetických polymerů. Tyto materiály se používají hlavně jako pojiva a lisovací hmoty, dále také nátěrové hmoty, na výrobu laminátů a lepidel. Ve své napěněné formě se využívají jako nehořlavé tepelné izolace, které mají velmi nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti.

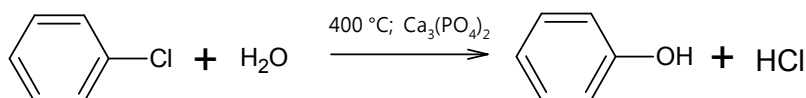
6.1. Výroba novolaků a rezolů

Základní suroviny pro výrobu fenoplastů jsou tedy formaldehyd a fenol. Formaldehyd je jedovatou, za běžné teploty bezbarvou plynou látkou se štiplavým zápachem. Řadíme jej mezi karcinogeny 1. stupně, tedy látky pro člověka prokazatelně karcinogenní. Získáme ho oxidací methanolu. Fenol je krystalická látka s nasládlým zápachem a pro člověka je také toxický. Dokáže poleptat všechny typy tkání a má neurotoxické účinky. Způsobů výroby fenolu je mnoho, využívá se např. dvoustupňový Raschigův způsob:

1. stupeň
oxichlorace benzenu:



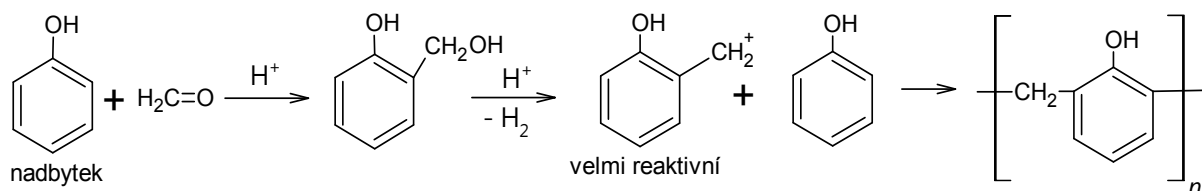
2. stupeň
katalytická hydrolýza parou:



Rovnice 12

Existují dva typy pryskyřic, které reakcí formaldehydu s fenolem můžeme získat. Jsou to novolaky a rezoly. V kyselém prostředí při nadbytku fenolu vznikají novolaky. Reakce je

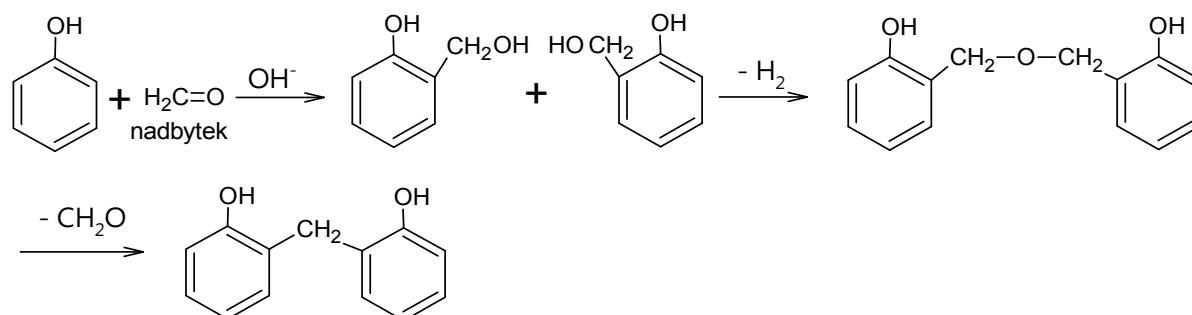
popsána rovnicí 13. Novolaky jsou lineární makromolekuly a řadíme je do skupiny termoplastů. Jsou to tavitelné plasty rozpustné v organických rozpouštědlech. Nedají se vytvrzovat přidávkem formaldehydu ani zvýšením teploty. Nejvíce se používají na lisovací hmoty a také na výrobu laků.



Rovnice 13

Další možné produkty reakce jsou rezoly, které jsou z pohledu izolačních lehčených fenolformaldehydových polymerů důležitější. Vznikají v alkalickém prostředí katalyzovanou polykondenzací s nadbytkem formaldehydu. Katalyzátorem může být v podstatě jakákoli zásada. Při reakci vzniká hodně methylolových skupin napojených na aromatický kruh, které snadno podléhají etherifikaci. Vznikají tak dimethylenetherové můstky, které se po zvýšení teploty nebo přidání kyselin přeměňují na methylenové můstky za současného odštěpení formaldehydu. Nově vzniklá methylenová spojení jsou stabilní.^[33]

Pojmem rezol tedy rozumíme směs, která obsahuje jednojaderné methylolfenoly, dvoujaderné methylolfenoly, zbytek fenolu a formaldehydu.^[33] Způsob napojování dvou methylolfenolů dimethylenetherovým můstkem je znázorněn rovnicí 14 v druhém kroku:



Rovnice 14

Tyto rezoly je možné vytvrzovat, tedy převádět do sesítovaného stavu. Vytvrzení se dosahuje ohřátím na vysokou teplotu, nebo přidávkem kyseliny, případně obojím. Nejčastějším způsobem napojení fenolových jednotek v síti je methylenový můstek. Takto vzniklý sesítovaný reaktoplast nazýváme resit. Díky vytvrzení má vlastnosti jako velmi dobrou chemickou odolnost, odolnost i proti UV záření a netavitelnost.

6.2. Výroba a vlastnosti izolačních fenoplastů

Výroba fenoplastických izolací

Tyto pórovité lehčené hmoty se vyrábí z kapalných rezolů a na vytvrzení se používají silné kyseliny. Takovým tvrdidlem může být například kyselina p-toluensulfonová. Poté, co se namíchá tvrdidlo, začne se při procesu vytvrzování reaktivní pryskyřice vyvíjet teplo. Abychom zajistili napěnění pryskyřice, musí být ve směsi přítomna ještě nějaká látka, která bude při zvýšené teplotě přecházet do plynné fáze a bude tedy fungovat jako nadouvadlo. Pro tento účel se používá benzín nebo alkoholy a ketony.^[33] Nemusí se však nutně jednat o kapalnou látku, lze používat tuhé látky jako např. uhličitan amonný, jehož teplota rozkladu je 58 °C. Tyto pěny se připravují především jako bloky v uzavřených formách, ale mohou se připravovat také litím do otevřených forem. Uzavíratelné formy bývají nejčastěji dřevěné a vyložené PE fólií nebo papírem.^[33] Desky bývají povrchově upravovány - opatřovány skelnými vlákny nebo hliníkovými reflexními fóliemi. Nejčastěji se připravují desky s objemovou hmotností 35 kg/m³.

Vlastnosti fenoplastických izolací

Pěněné fenolformaldehydové izolace mají především tu výhodu, že jsou nesnadno hořlavé. Patří do skupiny samozhášivých látek a při vystavení vysokým teplotám uhelnatí a vytváří štiplavý dým. Pokud nejsou speciálně upraveny proti ohni, dají se používat do teplot v rozmezí 110 až 130 °C. Přítomnost retardérů hoření jejich schopnost odolávat ohni samozřejmě ještě zvyšuje.

Další pozitivní vlastností PF je, že mají velmi nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Výrobce fenolických pěn Kingspan uvádí hodnotu $\lambda = 0,020$ W/mK při tloušťkách od 4,5 do 12 cm.^[34] S touto hodnotou λ jsou z tepelně izolačního hlediska nejlepšími materiály pro stavební izolace. Dále jsou odolné proti plísním a vykazují i výbornou chemickou odolnost. Fenolické desky jsou vyráběny tak, aby obsah uzavřených buněk byl 95 % a vyšší, navíc jsou často opatřeny parotěsnou povrchovou úpravou. Díky tomu jsou odolné proti pronikání vlhkosti. Pokud do systému i tak vnikne voda například v důsledku propíchnutí parotěsné zábrany, další průnik vlhkosti je omezen díky relativně uzavřené struktuře buněk.

Mezi hlavní nevýhody patří především cena. V porovnání s PS deskami jsou několikanásobně dražší. Cena za jeden m² o tloušťce 60 mm opatřený povrchovou úpravou (skelnou textílií) vyjde na více než 500 Kč, naproti tomu jeden m² polystyrenové izolace stejné tloušťky (ovšem bez povrchové úpravy) stojí okolo 80 Kč.^{[35] [36]} Pevnost fenolických napěněných desek v tlaku při 10% stlačení je 100 kPa.^[34]

Fenolické pěny rozhodně nejsou tak rozšířeným izolačním materiálem, jako je polystyren nebo polyuretan. Nicméně díky své velmi malé tepelné vodivosti není potřeba používat tlusté vrstvy izolací – často stačí jen několik cm. Jsou proto vhodné při rekonstrukcích, kdy chceme

ušetřit prostor, který bychom jinak zabraly jiným druhem izolace. Používají se na izolaci podlah, fasád a interiéru. Díky svým dobrým požárním vlastnostem se také používají v systémech ETICS jako obalové konstrukce budov. Výhodné je PF pěny použít v případě zateplování terasy. Zde je totiž tloušťka izolace limitována výškou prahu vstupních dveří nebo výškou zábradlí.

Jedním z největších výrobců stavebních izolačních materiálů je společnost Kingspan, která prodává fenolické izolace s obchodním názvem Kooltherm v několika variantách. Další výrobce je například společnost Baumit, která prodává kompozitní desku s obchodním názvem ResolutionTherm. Je složena fenolické pěny (jádro), která má po stranách jen několik mm široké šedé grafitové EPS vrstvy.^[37]

7. Závěr

Vypracoval jsem rešeršní práci, která podává základní přehled o nejčastěji používaných polymerních izolacích ve stavbách. Zabýval jsem se především výrobou a vlastnostmi lehčených hmot. V podstatě se jedná o pět základních typů materiálů: EPS (bílý a šedý), XPS, PUR pěny (měkké a tvrdé), PIR pěny a fenolické pěny. Na závěr je tedy žádoucí porovnat tyto materiály mezi sebou. Nelze totiž jednoznačně říci, který z těchto materiálů je pro izolace nejlepší a který nejhorší. Vždy máme k dispozici několik kritérií podle kterých daný materiál můžeme hodnotit. Hodně také záleží na tom, kterou část budovy chceme zateplovat.

První kritérium, které nás napadne při projektování nové stavby, je samozřejmě cena. Jako nejlevnější polymerní izolace se dnes prodává bílý expandovaný polystyren. Na trhu je spousta variant EPS, které se liší zejména svou pevností. Pevnější jsou samozřejmě dražší, nicméně stále patří do levnějších typů izolací. Naopak nejdražší polymerní izolací jsou povrchově upravené desky s jádrem z tuhé fenolické pěny a jejich cena několikanásobně převyšuje cenu ostatních izolací. Dalším kritériem, které je z podstaty věci vlastně to hlavní, je tepelná vodivost, kterou požadujeme co nejnižší. Naprosto nejlepší hodnoty součinitele tepelné vodivosti má právě nejdražší fenolická pěna (0,020 W/mK), a proto není nutné používat široké desky této izolace, což šetří drahocenný prostor. Další velmi nízkou teplotní vodivost mají PUR a PIR pěny, z čehož PIR vycházejí o trochu lépe. Polystyrenové izolace mají tepelnou vodivost o něco větší a je tedy potřeba širší vrstva pro stejný tepelně izolační efekt.

V momentě upevňování izolace na stěnu (nebo jiný povrch) nás bude zajímat především náročnost montáže a aplikace zateplovacího systému a také to, jestli se izolace může po nějakou dobu nechat odkrytá, dokud nepřijde na řadu další vrstva. Degradace na světle je u polystyrenu menší než u polyuretanů. Pozor si ale musíme dát v případě šedých grafitových EPS desek, u kterých může nastat problém při vystavení přímému slunečnímu svitu nebo letním vysokým teplotám, protože má asi sedmkrát větší tepelnou roztažnost oproti standardnímu bílému EPS. Z pohledu aplikace je nejsložitější izolace nástřikem PUR/PIR pěny. Nástřiky polyuretanových pěn by měla provádět firma s dlouholetou tradicí a bohatými zkušenostmi v oboru. Výrobcem pěny totiž není prodejce surovin pro výrobu pěny, ale realizátor, tedy ten, kdo provádí nástřik na místě a je tak zodpovědný za výsledné parametry a kvalitu PUR nebo PIR izolace. Vznik pěny je chemická reakce, jejíž výsledek velmi závisí na použitých složkách (isokyanátech, polyolech a nadouvadlech), které spolu reagují a především také na jejich poměru.

Pokud provádíme zateplení podlah, fasád nebo teras, oceníme u izolačního materiálu především pevnost. Nejpevnější polymerní izolace jsou tvrdé PUR pěny, u kterých se uvádí minimální pevnost v tlaku 400kPa. Dalším velmi pevným materiálem je XPS, který vyniká s hodnotou až 300 kPa. Na opačném konci seznamu budou samozřejmě měkké PUR pěny,

které mají pevnost velmi malou s hodnotami okolo 10 kPa. Takové se potom nejvíce hodí pro izolace šikmých střech, kde na pevnost příliš nehledíme a jde nám hlavně o to, aby byl materiál velmi lehký. Zlatá střední cesta jsou v podstatě ostatní typy polymerních izolací, jejichž pevnost se pohybuje v rozmezí 100 až 200 kPa a používají se nejčastěji na zateplovací systémy fasád a soklu.

Nevýhodou všech polymerních izolací je jejich reakce na oheň. Pokud chceme zajistit co nejmenší hořlavost, budeme mezi polymerními izolacemi volit fenolické pěny nebo polyisokyanurátové pěny. V ostatních případech jsou polymerní izolační materiály i přes přítomnost retardérů hoření v kategorii E. Minerální vaty používané na izolace mají v tomto směru velkou výhodu, neboť jejich kategorie hořlavosti je A1 a ohni tedy odolávají výborně.

Seznam použité literatury:

1. Stavba TZB. *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů*. Stavba.tzb-info.cz [online] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>
2. Stavba TZB. *Prostup tepla stavební konstrukcí*. Stavba.tzb-info.cz [online] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/312-tepelny-odpor-r#odporRT>
3. *Tepelné izolace – katalog tepelných izolací, veškeré info o zateplení a izolacích*, Izolace-info.cz [online]. Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/aktuality/9111-tridy-reakce-na-ohenu-stavebnich-materialu-a.html#.XRhibuszaUm>
4. Můj Dům, Přírodní izolace ve stavebnictví. Můj Dům, Stavíme Zařizujeme Bydlíme [online] 2010 [cit. 20.6.2019]. Dostupné z: https://www.mujdum.cz/rubriky/stavba/prirodni-izolace-ve-stavebnictvi_238.html
5. Izolace z ovčí vlny - Naturwool s.r.o.. Naturwool s.r.o. - Stavební tepelná izolace z ovčí vlny [online]. Copyright © [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.naturwool.cz/izolace-z-ovci-vlny/>
6. Maul J., Frushour B. G., Kontoff J. R., Eichenauer H., Ott. K., Schade Ch. *Polystyrene and styrene copolymers*, v *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (Gerhartz, W., Ed.), 7. vydání, Wiley-VCH 2011, sv 29, str. 481
7. MLEZIVA Josef, ŠŇUPÁREK Jaromír, *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7, str. 74-80
8. Hazardous Substances Data Bank [online], *National Library of Medicine (US), TOXNET*. *Styrene*; Hazardous Substances Databank Number: 171. Dostupné z: <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+171>
9. petroleum.cz, 2004 [online], *Ethylbenzen/Styren*. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/ethylbenzen-styren.aspx>
10. Maul J., Frushour B. G., Kontoff J. R., Eichenauer H., Ott. K., Schade Ch. *Polystyrene and styrene copolymers*, v *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (Gerhartz, W., Ed.), 7. vydání, Wiley-VCH 2011, sv 29, str. 477
11. Izolace z EPS pěnového polystyrenu - přehled výrobců expandovaného polystyrenu, Izolace-info.cz. *Tepelné izolace – katalog tepelných izolací, veškeré info o zateplení a izolacích*. Izolace-info.cz, 2008 [online], [cit. 12.6.2019] Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/katalog/polystyren/expandovany-polystyren/>
12. Izolační praxe - EPS. *EPS ČR - Sdružení pěnového polystyrenu v ČR a SR* [online]. Ke stažení - *IP 1 Vlastnosti EPS*. Dostupné z: <https://epscr.cz/stavebnictvi/casopis-izolacni-praxe/>
13. Stavba TZB. *Izolační desky z pěnového polystyrenu mají nové značení*. Stavba.tzb-info.cz [online] Dostupné z:

- <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/117285-izolacnich-desky-z-penoveho-polystyrenu-maji-nove-znaceni>
14. Co je ETICS? Bena stavebniny. *Stavebniny BENA Praha 5 - Radotín* [online]. Dostupné z: <https://www.bena-stavebniny.cz/sluzby/fasady/co-je-etics/>
 15. Izolační praxe - EPS. *EPS ČR - Sdružení pěnového polystyrenu v ČR a SR* [online]. Ke stažení - *IP 12 Snižování hořlavosti EPS izolací*. Dostupné z: <https://epscr.cz/stavebnictvi/casopis-izolacni-praxe/>
 16. Šedý polystyren. Tepelná izolace nové generace, *Stavebnictvi3000.cz. Nejvíce informací o stavebnictví v ČR. Stavebnictvi3000.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sedy-polystyren-tepelna-izolace-nove-generace>
 17. Stavba TZB. *Základní pravidla pro zateplování šedým polystyrenem*. Stavba.tzb-info.cz [online] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/12722-dodrzuje-zakladni-pravidla-pro-zateplovani-sedym-polystyrenem>
 18. XPS Production Line, CO₂ Foam XPS Production Line. In: Youtube [online] 18. 6. 2016 [cit. 20. 6. 2019] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1YZ637-1xOo>. Kanál uživatele USEON
 19. Production URSA XPS. In: Youtube [online] 23.11.2017 [cit. 20. 6. 2019] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=niiBiKrv72Q>. Kanál uživatele URSA Business Unit Adria
 20. Co je vlastně extrudovaný polystyren a proč ho použít? *Stavebniny-Rychle.cz. Stavebniny, tepelné izolace. Stavebniny-Rychle.cz* [online] 2011 [cit. 20.6.2019] Dostupné z: <http://www.stavebniny-rychle.cz/co-je-vlastne-extrudovany-polystyren-a-proc-ho-pouzit.html>
 21. Technické informace. URSA: tepelné, akustické a protipožární minerální izolace ze skelné vlny. [online] 2012 URSA Insulation, s.a [cit. 20.6.2019] Dostupné z: <https://www.ursa.cz/cs-cz/produkty/ursa-xps/izolace-z-extrudovaneho-polystyrenu-ursa-xps-n-iii-l/stranky/technicke-informace.aspx>
 22. Austrotherm Česká republika - Austrotherm XPS TOP P GK. [online] Dostupné z: http://www.austrotherm.cz/front_content.php?idart=800
 23. Styrodur 3000 CS. ISOVER: tepelné izolace, zvukové izolace a protipožární izolace [online] Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/styrodur-3000-cs>
 24. Zpracování PUR pěn - TVI Pur. Hlavní stránka - TVI Pur [online] Dostupné z: <https://tvi-pur.cz/zpracovani-polyuretanovych-pur-pen-nastrikem-a-litim/>
 25. Ducháček V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. 2006. ISBN 80-7080-617-6, str. 97
 26. Substances Data Bank [online], *National Library of Medicine (US), TOXNET*. 2,4-toluene diisocyanate; Hazardous Substances Databank Number: 874. Dostupné z: <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+874>

27. PROKOPOVÁ Irena: *Makromolekulární chemie*. 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3, str. 183
28. MLEZIVA Josef, ŠŇUPÁREK Jaromír, *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7, str. 316-325
29. DROCHYTKA Rostislav. *Plastické látky*. Brno: VUT Brno, 2007, str. 95-98
30. Sanace-staveb.cz [online]. *Tlaková injektáž*. Dostupné z: <http://www.sanace-staveb.cz/cs/Sanaceni-technologie/tlakova-injektaz/>
31. Stroje pro aplikace PUR pěn, polyurea a PUR elastomerů. TVI Pur [online]. Dostupné z: <https://tvi-pur.cz/prodej-stroju/stroje-pro-nastrik-pur-pen-a-polyurea-elastomeru.html>
32. Izolace a zateplení domu - přehled plastových pěnových materiálů. *Nazeleno.cz - Chytrá řešení pro každého* [online]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/stavba/izolace/izolace-a-zatepleni-domu-prehled-plastovych-penovych-materialu.aspx>
33. MLEZIVA Josef, ŠŇUPÁREK Jaromír, *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7, str. 238-239, 250
34. Kooltherm K3 Podlahová deska. Kingspan Česká Republika [online] Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs-cz/produkty/izolace/izolacni-desky/kooltherm-k3-podlahova-deska>
35. Tepelná izolace KOOLTHERM K5 na fasádu 60 mm (1200x400 mm). *Stavebniny DEK* [online]. Dostupné z: https://www.dek.cz/produkty/detail/1421013080-kooltherm-k5-60mm-4-8m2-bal?tab_id=popis
36. Fasádní polystyren EPS 70F 60 mm (1000x500 mm). *Stavebniny DEK* [online]. Dostupné z: https://www.dek.cz/produkty/detail/1460403060-eps-70f-60mm-500x1000-dek-isover-4m2-bal/25?tab_id=popis
37. *Baumit.co.uk. Architectural Rendering, Facade Renovation and Design, Baumit* [online]. Dostupné z: https://baumit.co.uk/files/uk/pdf_files/pdbl_resolutiontherm.pdf