



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

Ing. Jan Navrátil

**Studium možností využití vybraných typů  
modifikovaných termoplastů po skončení jejich životního  
cyklu**

**Study of Modified Thermoplastics' Utilization Possibilities  
after the End of their Lifecycle**

Disertační práce

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

Zlín: 2015

*Motto:*

„Alea iacta est“

Julius Caesar, 49 př. n. l.

*Poděkování:*

Tímto bych velmi rád poděkoval zejména svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za možnost zpracovávat tuto disertační práci pod jeho odborným vedením, za cenné rady a připomínky při jejím zpracování a za neutuchající podporu při všech mých mimouniverzitních aktivitách.

Můj velký dík patří taktéž mým rodičům za střechu nad hlavou a za materiální i nemateriální podporu během celé doby mého studia.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem dalším akademickým pracovníkům, kolegům, spolužákům a přátelům, kteří se přímo nebo nepřímo podíleli na tvorbě této práce.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektů Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/10/FT/11/D, IGA/FT/2012/041, IGA/FT/2013/020, IGA/FT/2014/016 a IGA/FT/2015/006.

## ABSTRAKT

Radiační síťování je technologie umožňující relativně snadnou úpravu vlastností polymerních materiálů, což ji v současné době řadí mezi jednu z nejpoužívanějších modifikací. Na druhou stranu takto upravené polymerní materiály nelze opakovaně roztavit a vyvstává tak otázka jejich opětovného zpracování. Účelem této disertační práce je proto definovat možnost využití radiačně zesíťovaných polymerních materiálů po skončení jejich životního cyklu a popsat vlastnosti nově vzniklých materiálů.

Disertační práce se zaměřuje na polyetyleny, u nichž je největší potenciál budoucí recyklace. Radiačně zesíťovaný vysoko-hustotní polyetylen byl použit jako plnivo a nízko i vysoko-hustotní polyetylen jako matrice. Celkově bylo připraveno pět kombinací směsí v koncentracích od 10 do 60 %, které se od sebe lišili zejména výchozí formou obou složek směsi. Vliv plniva na výsledné chování směsí byl porovnáván z hlediska mechanických, tepelných a tokových vlastností.

Z naměřených výsledků je patrné, že směsi s matricí z nízko-hustotního polyetyleny vykazují s rostoucím podílem plniva výrazný nárůst tuhosti, pevnosti, tvrdosti a dochází u nich k nárůstu teploty měknutí. Na druhou stranu u nich došlo k poklesu houževnatosti a zhoršení tokových vlastností. Tyto výsledky byly podpořeny strukturní analýzou, která potvrdila vznik velmi pevného rozhraní mezi plnivem a matricí.

U směsí s matricí z vysoko-hustotního polyetyleny je vliv na mechanické vlastnosti velmi závislý na dané koncentraci plnění a nelze ho tedy jednoznačně definovat. Tepelné vlastnosti zůstaly zachovány a tokové vlastnosti se zhoršily. Strukturní analýza opět potvrdila vznik rozhraní mezi oběma složkami směsi; nicméně jeho pevnost také závisí na dané koncentraci.

*Klíčová slova:* recyklace, plnivo, HDPE, LDPE, radiační síťování, mechanické vlastnosti, zpracovatelské vlastnosti, tepelné vlastnosti, strukturní analýza

## ABSTRACT

Radiation crosslinking is a technology allowing relatively simple properties customization of polymer materials, which makes it one of the most used modifications. On the other hand, such modified polymer materials cannot be melted repeatedly and this raises a question of their reprocessing. The main purpose of this dissertation thesis is thus defining a possibility of radiation crosslinked polymer materials utilization after the end of their lifecycle and describing properties of newly prepared materials.

This dissertation thesis is focused on polyethylenes, which have the highest potential of future recycling. Radiation crosslinked high-density polyethylene was used as filler and both low- and high-density polyethylenes were used as matrix. Five mixture combinations in concentrations from 10 to 60 % were prepared in total. They differed from each other mainly by initial form of both mixture components. Influence of the filler on resulting mixtures behavior was compared considering mechanical, thermal and flow properties.

Obtained results shown that mixtures with low-density polyethylene matrix have significant stiffness, strength and hardness increase with increasing filler concentration and softening temperature is increased as well. On the contrary, toughness decreased and flow properties were worsened. These results were supported by structural analysis, which confirmed strong interface formation between the filler and the matrix.

Influence on mechanical properties of mixtures with high-density polyethylene matrix is highly dependent on given filler concentration and hence cannot be unambiguously defined. Thermal properties remained unchanged and flow properties were worsened. Structural analysis also confirmed interface formation between both mixture components; however, its strength is also dependent on given concentration.

*Keywords:* Recycling, Filler, HDPE, LDPE, Radiation Crosslinking, Mechanical Properties, Processing Properties, Thermal Properties, Structural Analysis



**OBSAH PRÁCE**

<b>SEZNAM ILUSTRACÍ .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....</b>	<b>12</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>15</b>
1.1 POLYMERY .....	15
1.1.1 Polyetyleny .....	17
1.2 OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ .....	19
1.2.1 Typy záření .....	19
1.2.2 Typy ionizujícího záření .....	20
1.2.3 Typy reakcí .....	21
1.2.4 Radiační síťování polyetylenů .....	23
1.2.5 Aplikace radiačního síťování polyetylenů .....	24
1.2.6 Radiačně zesíťované polyetylenové trubky (PE <sub>x</sub> trubky) .....	24
1.3 RECYKLACE POLYMERŮ .....	25
1.3.1 Mechanická recyklace .....	26
1.3.2 Chemická recyklace .....	28
1.3.3 Spalování .....	30
<b>2 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>31</b>
<b>3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>32</b>
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	32
3.1.1 Zkoumané směsi materiálů .....	33
3.2 PŘÍPRAVA SMĚSÍ A ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	33
3.2.1 Příprava materiálů .....	33
3.2.2 Míchání materiálů .....	35
3.2.3 Příprava zkušebních těles .....	35
3.3 PROVEDENÉ ZKOUŠKY .....	36
3.3.1 Mechanické vlastnosti .....	37
3.3.2 Tepelné vlastnosti .....	37
3.3.3 Zpracovatelské vlastnosti .....	37
3.3.4 Strukturní analýza .....	39
3.4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT .....	39
<b>4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....</b>	<b>40</b>
4.1 SMĚS A - GRANULÁT LDPE + DRŤ RHDPE <sub>x</sub> .....	40
4.1.1 Mechanické vlastnosti .....	40
4.1.2 Tepelné vlastnosti .....	49
4.1.3 Zpracovatelské vlastnosti .....	49

---

4.2	SMĚS B - GRANULÁT LDPE + PRÁŠEK RHDPE <sub>x</sub> .....	50
4.2.1	Mechanické vlastnosti .....	50
4.2.2	Tepelné vlastnosti .....	59
4.2.3	Zpracovatelské vlastnosti .....	60
4.3	SMĚS C - PRÁŠEK LDPE + PRÁŠEK RHDPE <sub>x</sub> .....	62
4.3.1	Mechanické vlastnosti .....	62
4.3.2	Tepelné vlastnosti .....	70
4.3.3	Zpracovatelské vlastnosti .....	71
4.4	SMĚS D - GRANULÁT HDPE + DRŤ RHDPE <sub>x</sub> .....	73
4.4.1	Mechanické vlastnosti .....	73
4.4.2	Tepelné vlastnosti .....	82
4.4.3	Zpracovatelské vlastnosti .....	82
4.5	SMĚS E - GRANULÁT HDPE + PRÁŠEK RHDPE <sub>x</sub> .....	83
4.5.1	Mechanické vlastnosti .....	83
4.5.2	Tepelné vlastnosti .....	92
4.5.3	Zpracovatelské vlastnosti .....	93
4.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ SMĚSÍ A-C .....	94
4.7	DISKUZE VÝSLEDKŮ SMĚSÍ D-E .....	106
<b>5</b>	<b>PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI .....</b>	<b>116</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>117</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA .....</b>	<b>124</b>
	<b>CV AUTORA.....</b>	<b>132</b>
	<b>PŘÍLOHA A: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE .....</b>	<b>133</b>
	<b>PŘÍLOHA B: MATERIÁLOVÝ LIST LDPE .....</b>	<b>134</b>
	<b>PŘÍLOHA C: TOKOVÁ KŘIVKA LDPE A HDPE.....</b>	<b>135</b>

## SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 1.1: Základní rozdělení polymerů [3, 6]</i> .....	15
<i>Obr. 1.2: Amorfni uspořádání řetězců [4]</i> .....	16
<i>Obr. 1.3: Semikrystalické uspořádání řetězců [4]</i> .....	16
<i>Obr. 1.4: Molekula polyetyleny [12-13]</i> .....	17
<i>Obr. 1.5: Strukturní řetězec LDPE [5, 12]</i> .....	18
<i>Obr. 1.6: Strukturní řetězec HDPE [5, 12]</i> .....	18
<i>Obr. 1.7: Proces tvorby sítě u polyetyleny [22]</i> .....	23
<i>Obr. 1.8: Podíl recyklace u spotřebního zboží [2, 38]</i> .....	25
<i>Obr. 1.9: Životní cyklus plastového výrobku [40]</i> .....	26
<i>Obr. 1.10: Technologický postup mechanické recyklace [2, 12]</i> .....	27
<i>Obr. 1.11: Třídění plastů dle kategorie [2, 38]</i> .....	28
<i>Obr. 1.12: Chemická recyklace [2]</i> .....	29
<i>Obr. 3.1: HDPE<sub>x</sub> trubky pro podlahové vytápění</i> .....	32
<i>Obr. 3.2: Velikost částic drti rHDPE<sub>x</sub></i> .....	34
<i>Obr. 3.3: Velikost částic prášku rHDPE<sub>x</sub></i> .....	34
<i>Obr. 3.4: Velikost částic prášku LDPE</i> .....	34
<i>Obr. 3.5: Fluidní míchačka [50]</i> .....	35
<i>Obr. 3.6: Zkušební tělísko - tyčinka</i> .....	35
<i>Obr. 3.7: Zkušební tělísko - lopatka</i> .....	36
<i>Obr. 3.8: Spirálová dutina [58]</i> .....	38
<i>Obr. 4.1: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	40
<i>Obr. 4.2: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	41
<i>Obr. 4.3: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty</i> .....	42
<i>Obr. 4.4: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	43
<i>Obr. 4.5: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	44
<i>Obr. 4.6: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty</i> .....	45
<i>Obr. 4.7: Maximální vrubová houževnatost</i> .....	46
<i>Obr. 4.8: Tvrdost Shore D</i> .....	47
<i>Obr. 4.9: Vtisková tvrdost</i> .....	48
<i>Obr. 4.10: Teplota měknutí</i> .....	49
<i>Obr. 4.11: Délka zatečení ve spirále</i> .....	50
<i>Obr. 4.12: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	51
<i>Obr. 4.13: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	52
<i>Obr. 4.14: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty</i> .....	53
<i>Obr. 4.15: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	54
<i>Obr. 4.16: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	55
<i>Obr. 4.17: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty</i> .....	56
<i>Obr. 4.18: Maximální vrubová houževnatost</i> .....	57
<i>Obr. 4.19: Tvrdost Shore D</i> .....	58
<i>Obr. 4.20: Vtisková tvrdost</i> .....	59
<i>Obr. 4.21: Teplota měknutí</i> .....	59
<i>Obr. 4.22: Index toku taveniny</i> .....	60

---

<i>Obr. 4.23: Délka zatečení ve spirále .....</i>	61
<i>Obr. 4.24: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	62
<i>Obr. 4.25: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	63
<i>Obr. 4.26: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	64
<i>Obr. 4.27: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty.....</i>	65
<i>Obr. 4.28: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	66
<i>Obr. 4.29: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty .....</i>	67
<i>Obr. 4.30: Maximální vrubová houževnatost .....</i>	68
<i>Obr. 4.31: Tvrdost Shore D .....</i>	69
<i>Obr. 4.32: Vtisková tvrdost .....</i>	70
<i>Obr. 4.33: Teplota měknutí .....</i>	70
<i>Obr. 4.34: Index toku taveniny.....</i>	71
<i>Obr. 4.35: Délka zatečení ve spirále .....</i>	72
<i>Obr. 4.36: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	73
<i>Obr. 4.37: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	74
<i>Obr. 4.38: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	75
<i>Obr. 4.39: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty.....</i>	76
<i>Obr. 4.40: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	77
<i>Obr. 4.41: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty .....</i>	78
<i>Obr. 4.42: Maximální vrubová houževnatost .....</i>	79
<i>Obr. 4.43: Tvrdost Shore D .....</i>	80
<i>Obr. 4.44: Vtisková tvrdost .....</i>	81
<i>Obr. 4.45: Teplota měknutí .....</i>	82
<i>Obr. 4.46: Délka zatečení ve spirále .....</i>	83
<i>Obr. 4.47: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	84
<i>Obr. 4.48: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	85
<i>Obr. 4.49: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	86
<i>Obr. 4.50: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty.....</i>	87
<i>Obr. 4.51: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	88
<i>Obr. 4.52: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty .....</i>	89
<i>Obr. 4.53: Maximální vrubová houževnatost .....</i>	90
<i>Obr. 4.54: Tvrdost Shore D .....</i>	91
<i>Obr. 4.55: Vtisková tvrdost .....</i>	92
<i>Obr. 4.56: Teplota měknutí .....</i>	93
<i>Obr. 4.57: Délka zatečení ve spirále .....</i>	94
<i>Obr. 4.58: Srovnání modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	94
<i>Obr. 4.59: Srovnání meze pevnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	95
<i>Obr. 4.60: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	95
<i>Obr. 4.61: Srovnání modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty.....</i>	96
<i>Obr. 4.62: Srovnání meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	96
<i>Obr. 4.63: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty .....</i>	97
<i>Obr. 4.64: Srovnání vrubové houževnatosti .....</i>	97
<i>Obr. 4.65: Srovnání tvrdosti .....</i>	98

---

<i>Obr. 4.66: Srovnání mikrotvrdosti</i> .....	98
<i>Obr. 4.67: Srovnání teploty měknutí</i> .....	99
<i>Obr. 4.68: Srovnání indexu toku taveniny</i> .....	100
<i>Obr. 4.69: Srovnání zatékavosti</i> .....	100
<i>Obr. 4.70: Struktura směsi A</i> .....	102
<i>Obr. 4.71: Struktura směsi B</i> .....	103
<i>Obr. 4.72: Struktura směsi C</i> .....	104
<i>Obr. 4.73: Srovnání struktury směsí</i> .....	105
<i>Obr. 4.74: Srovnání modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	106
<i>Obr. 4.75: Srovnání meze pevnosti v tahu za pokojové teploty</i> .....	106
<i>Obr. 4.76: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty</i> ....	107
<i>Obr. 4.77: Srovnání modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	108
<i>Obr. 4.78: Srovnání meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty</i> .....	108
<i>Obr. 4.79: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty</i> .....	109
<i>Obr. 4.80: Srovnání vrubové houževnatosti</i> .....	109
<i>Obr. 4.81: Srovnání tvrdosti</i> .....	110
<i>Obr. 4.82: Srovnání výsledků mikrotvrdosti</i> .....	110
<i>Obr. 4.83: Srovnání teploty měknutí</i> .....	111
<i>Obr. 4.84: Srovnání zatékavosti</i> .....	111
<i>Obr. 4.85: Struktura směsi D</i> .....	113
<i>Obr. 4.86: Struktura směsi E</i> .....	114
<i>Obr. 4.87: Srovnání struktury směsí</i> .....	115

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1.1: Základní charakteristika polyetylenů [2, 6-7, 12] .....</i>	18
<i>Tab. 1.2: Příklad velikostí dávek záření pro různé aplikace [20] .....</i>	20
<i>Tab. 1.3: Srovnání jednotlivých typů ionizujícího záření [17, 20] .....</i>	21
<i>Tab. 1.4: Klasifikace materiálů dle reakce na záření [14-15, 17, 20] .....</i>	22
<i>Tab. 3.1: Jednotlivé směsi.....</i>	33
<i>Tab. 3.2: Procesní parametry jednotlivých směsí.....</i>	36
<i>Tab. 3.3: Procesní parametry jednotlivých směsí při zkoušce zatékavosti ....</i>	38
<i>Tab. 4.1: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	40
<i>Tab. 4.2: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	41
<i>Tab. 4.3: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty.....</i>	42
<i>Tab. 4.4: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	43
<i>Tab. 4.5: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	44
<i>Tab. 4.6: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty</i>	45
<i>Tab. 4.7: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti .....</i>	46
<i>Tab. 4.8: Naměřená data tvrdosti Shore D.....</i>	47
<i>Tab. 4.9: Naměřená data vtiskové tvrdosti .....</i>	48
<i>Tab. 4.10: Naměřená data délky zatečení ve spirále.....</i>	49
<i>Tab. 4.11: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	50
<i>Tab. 4.12: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	51
<i>Tab. 4.13: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty.....</i>	52
<i>Tab. 4.14: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	53
<i>Tab. 4.15: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	54
<i>Tab. 4.16: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty.....</i>	55
<i>Tab. 4.17: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti .....</i>	56
<i>Tab. 4.18: Naměřená data tvrdosti Shore D.....</i>	57
<i>Tab. 4.19: Naměřená data vtiskové tvrdosti .....</i>	58
<i>Tab. 4.20: Naměřená data indexu toku taveniny .....</i>	60
<i>Tab. 4.21: Naměřená data délky zatečení ve spirále.....</i>	61
<i>Tab. 4.22: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	62
<i>Tab. 4.23: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty.....</i>	63
<i>Tab. 4.24: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty.....</i>	63
<i>Tab. 4.25: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	64
<i>Tab. 4.26: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	65
<i>Tab. 4.27: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty.....</i>	66
<i>Tab. 4.28: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti .....</i>	67
<i>Tab. 4.29: Naměřená data tvrdosti Shore D.....</i>	68
<i>Tab. 4.30: Naměřená data vtiskové tvrdosti .....</i>	69

---

<i>Tab. 4.31: Naměřená data indexu toku taveniny .....</i>	71
<i>Tab. 4.32: Naměřená data délky zatečení ve spirále .....</i>	72
<i>Tab. 4.33: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	73
<i>Tab. 4.34: Naměřená data meze pevnosti za pokojové teploty .....</i>	74
<i>Tab. 4.35: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	75
<i>Tab. 4.36: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	76
<i>Tab. 4.37: Naměřená data meze pevnosti za zvýšené teploty .....</i>	77
<i>Tab. 4.38: Naměřená data poměrného prodloužení za zvýšené teploty .....</i>	78
<i>Tab. 4.39: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti .....</i>	79
<i>Tab. 4.40: Naměřená data tvrdosti Shore D .....</i>	80
<i>Tab. 4.41: Naměřená data vtiskové tvrdosti .....</i>	81
<i>Tab. 4.42: Naměřená data délky zatečení ve spirále .....</i>	82
<i>Tab. 4.43: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	83
<i>Tab. 4.44: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty .....</i>	84
<i>Tab. 4.45: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty .....</i>	85
<i>Tab. 4.46: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	86
<i>Tab. 4.47: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty .....</i>	87
<i>Tab. 4.48: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty .....</i>	88
<i>Tab. 4.49: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti .....</i>	89
<i>Tab. 4.50: Naměřená data tvrdosti Shore D .....</i>	90
<i>Tab. 4.51: Naměřená data vtiskové tvrdosti .....</i>	91
<i>Tab. 4.52: Naměřená data délky zatečení ve spirále .....</i>	93

**SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

$^{60}\text{Co}$	Kobalt 60
$^{137}\text{Cs}$	Cesium 137
$^{192}\text{Ir}$	Iridium 192
%	Procento
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
$\mu\text{m}$	Mikrometr
$\sigma_{\text{M}}$	Mez pevnosti v tahu [MPa]
$\varepsilon_{\text{M}}$	Poměrné prodloužení v tahu na mezi pevnosti [%]
$A_{\text{M}}$	Maximální vrubová houževnatost [ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ]
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	Etylen
$\text{cm}^3$	Centimetr krychlový
C	Atom uhlíku
CO	Oxid uhelnatý
CR	Chloroprenový kaučuk
DSI	Depth sensing indentation
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
eV	Elektronvolt
g	Gram
Gy	Gray
$\text{H}_2$	Molekula vodíku
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylen
HDPE <sub>x</sub>	Radiačně zesíťovaný vysoko-hustotní polyetylen
HIT	Vtisková tvrdost [MPa]
hod	Hodina
J	Joule
IR	Izoprenový kaučuk
IIR	Butylkaučuk
keV	Kiloelektronvolt
kJ	Kilojoule
kGy	Kilogray



---

kg	Kilogram
LDPE	Nízko-hustotní polyetylen
LLDPE	Lineární nízko-hustotní polyetylen
nm	Nanometr
m <sup>2</sup>	Metr čtvereční
MDPE	Středně-hustotní polyetylen
MeV	Megaelektronvolt
min	Minuta
MJ	Megajoule
MPa	Megapascal
mm	Milimetr
n	Počet proměnných
N	Newton
PA	Polyamid
PE	Polyetylen
PE <sub>x</sub>	Radiačně zesíťovaný polyetylen
PET	Polyetylentereftalát
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmetakrylát
POM	Polyoxymetylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTFE	Polyetylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
rHDPE <sub>x</sub>	Recyklovaný radiačně zesíťovaný vysoko-hustotní polyetylen
s	Sekunda
ShD	Jednotka tvrdosti dle Shore D
SI	Mezinárodní soustava jednotek
T <sub>g</sub>	Teplota skelného přechodu
TPO	Termoplastický elastomer na bázi polyolefinů
TPU	Termoplastický elastomer na bázi polyuretanů

---

$u_A$	Nejistota měření typu A
UHMWPE	Polyetylen s ultra vysokou molekulovou hmotností
UV	Ultrafialový
YI	Index žlutosti
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
$x_i$	Proměnná

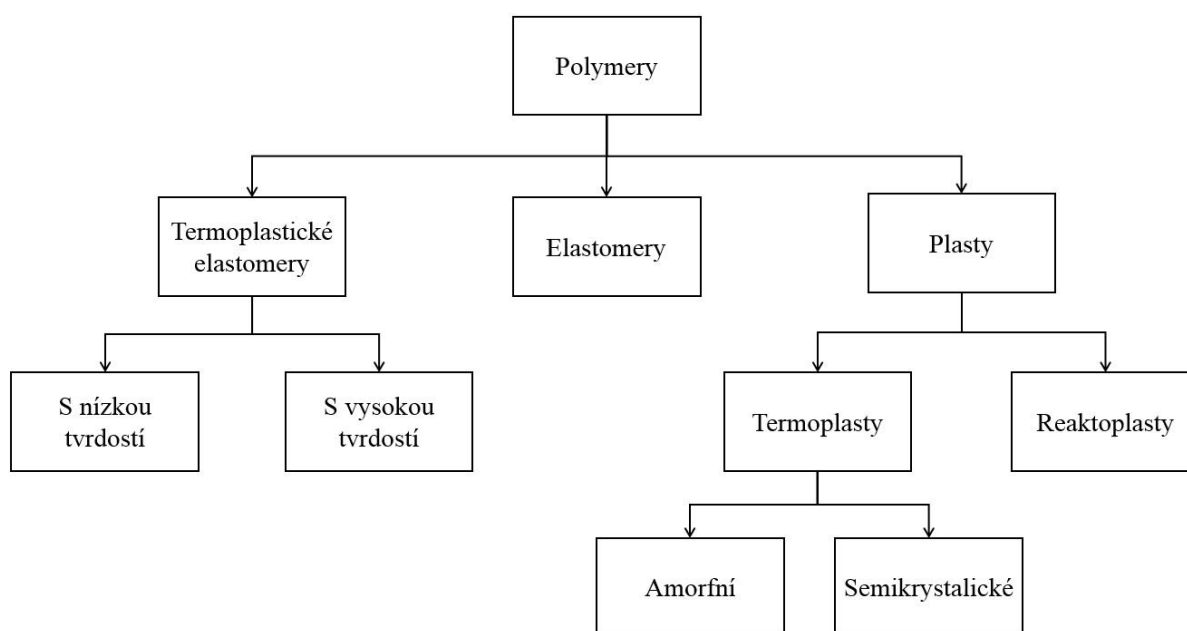
# 1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Modifikace polymerních materiálů technologií radiačního sítování je v současné době jednou z nejpoužívanějších technologií pro úpravu vlastností polymerních materiálů. Přesto není problematika opětovného zpracování takto modifikovaných materiálů doposud uspokojivě řešena.

## 1.1 Polymery

Polymery jsou makromolekulární látky, které vznikají opakovaným spojováním základních jednotek – merů. Jejich název je odvozen ze dvou řeckých slov – poli = mnoho a meros = část, tedy mnoho částí. Jejich unikátní vlastnosti spolu s dobrou zpracovatelností umožnili jejich rozšíření do téměř všech odvětví běžného života. V současné době jsou nejvíce zastoupeny v potravinářském a automobilovém průmyslu; nicméně jsou používány i ve zdravotnictví, stavebnictví a například i při výrobě elektroniky [1-4].

Polymery se dělí na několik typů (Obr. 1.1), které se od sebe, z hlediska svého zpracování a výsledných vlastností, velmi liší; nicméně společnou vlastností všech typů je velmi nízká tepelná a elektrická vodivost a relativně nízká hustota ( $0,8 - 2,2 \text{ g/cm}^3$ ) [3, 5].

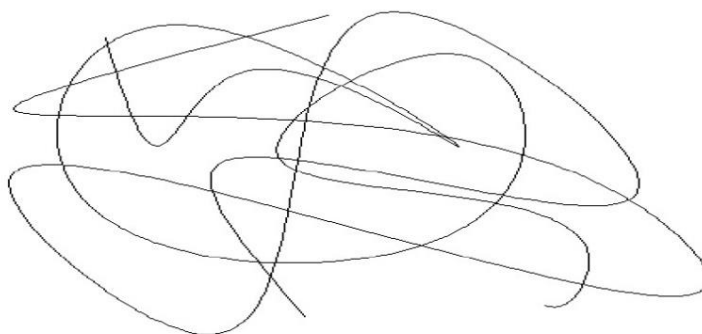


Obr. 1.1: Základní rozdělení polymerů [3, 6]

### Termoplasty

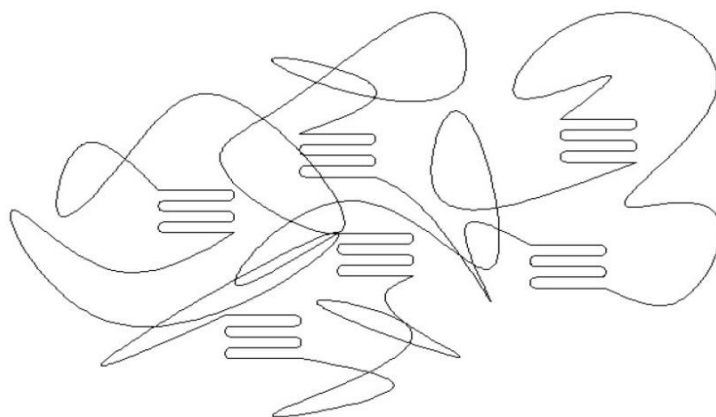
Největší skupinu polymerních materiálů tvoří tzv. termoplasty, jejichž charakteristickou vlastností je opakovaná tavitelnost. Řetězce těchto materiálů drží pohromadě vlivem mezimolekulárních sil, které účinky tepla slábnou a materiál přechází do viskoelastického stavu, ve kterém ho lze zpracovávat. Po ochlazení přechází zpět do stavu tuhého. Z hlediska struktury, resp. uspořádání řetězců rozlišujeme semikrystalické a amorfni termoplasty [4, 7-8].

Amorfní termoplasty se vyznačují nepravidelným prostorovým uspořádáním strukturních řetězců (Obr. 1.2). Použitelnost výrobků z amorfních termoplastů je pod teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ), při níž mají dostatečnou pevnost. Typickým znakem těchto materiálů je jejich transparentnost, nízká chemická odolnost, dále pak vysoká tvrdost a tuhost, ale naopak velká křehkost. Ze zpracovatelského hlediska jsou charakterizovány relativně nízkou hodnotou smrštění. Mezi amorfní termoplasty patří polymethylmetakrylát (PMMA), polyvinylchlorid (PVC), polycarbonát (PC) a polystyren (PS) [4, 7, 9-10].



Obr. 1.2: Amorfní uspořádání řetězců [4]

Semikrystalické termoplasty jsou tvořeny amorfní i krystalickou částí. V krystalické části jsou řetězce pravidelně prostorově uspořádány, v amorfní nepravidelně (Obr. 1.3). Podíl krystalické části je vyjadřován tzv. stupněm krystalinity, který se pohybuje v rozmezí 30 – 80 %. Použitelnost výrobků ze semikrystalických termoplastů je nad teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ), kde mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti. Tyto materiály se dále vyznačují svou neprůhledností, velmi dobrou chemickou odolností a vysokou hodnotou smrštění. Mezi zástupce semikrystalických materiálů patří polyetylen (PE), polyamid (PA), polyoxymetylen (POM) a polypropylen (PP) [4, 7, 9-10].



Obr. 1.3: Semikrystalické uspořádání řetězců [4]

### Reaktoplasty

Na rozdíl od termoplastů dochází u reaktoplastů (neboli také termosetů) během zpracování k chemické reakci. Účinky tepla a tlaku u nich dochází k vytvoření

chemických vazeb mezi jednotlivými řetězci a vzniku velmi husté prostorové sítě, přičemž tento proces se u reaktoplastů nazývá vytvrzování. Tyto materiály se vyznačují zejména velmi dobrou tepelnou a chemickou odolností, tuhostí, rozměrovou stabilitou a nízkou hořlavostí. Na druhou stranu je nelze opětovně tavit. Největší uplatnění nacházejí jako adheziva, elektrické izolace, nebo například při výrobě lehčených hmot. Mezi reaktoplasty patří fenol formaldehyd, melamin formaldehyd, polyuretany, epoxidy a některé polyestery [2, 4, 6-7].

### *Elastomery*

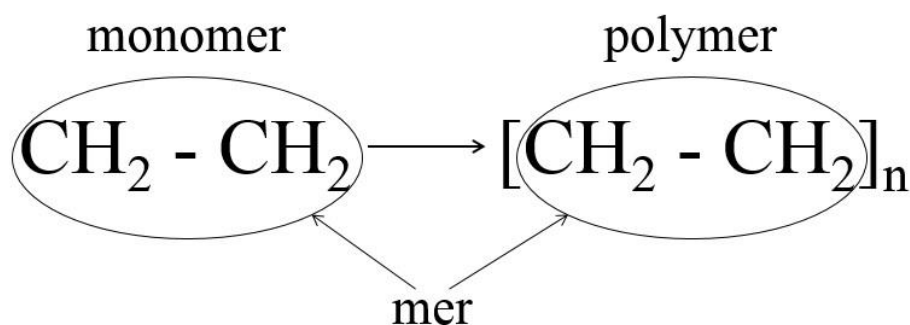
U elastomerů, podobně jako reaktoplastů, dochází během zpracování k chemické reakci. Tento proces se nazývá vulkanizace a vzniklá prostorová síť má, na rozdíl od reaktoplastů, relativně nízkou hustotu. V důsledku toho mohou být elastomery za běžných podmínek opakovaně vratně deformovány bez porušení. Tato vlastnost je předurčuje k použití jako tlumící a těsnící elementy; nicméně primárně jsou elastomery využívány při výrobě pneumatik. Vedle přírodního kaučuku patří mezi elastomery také například izoprenové kaučuky (IR), butylkaučuky (IIR) a chloroprenové kaučuky (CR) [6-7].

### *Termoplastické elastomery*

Zvláštní skupinu polymerů tvoří tzv. termoplastické elastomery. Tyto materiály mohou být vratně deformovány podobně jako elastomery, ale zároveň si zachovávají opakovanou tavitelnost stejně jako termoplasty. Mezi jejich možné aplikace patří různé automobilové komponenty, podrážky bot a například protiskluzová ochrana úchytů. Termoplastické elastomery mohou být mimo jiné na bázi polyolefinů (TPO), nebo polyuretanů (TPU) [7, 11].

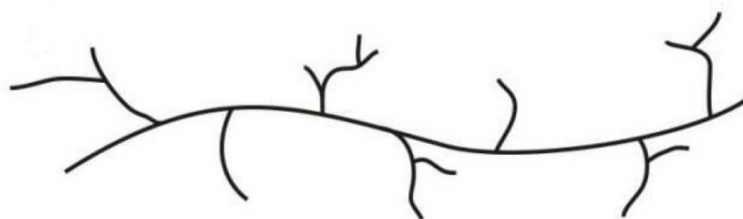
## 1.1.1 Polyetyleny

Patří do skupiny semikrystalických termoplastů, přičemž jejich molekuly jsou složeny pouze z uhlíku a vodíku (Obr. 1.4). Mezi základní dva typy polyetylenů patří vysoko a nízko-hustotní polyetylen (HDPE a LDPE). Kromě nich zde patří i lineární nízko-hustotní polyetylen (LLDPE), středně-hustotní polyetylen (MDPE) a polyetylen s ultra vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE). Jejich vlastnosti jsou silně závislé na molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání merů v řetězci makromolekuly a stupni krystalinity [3, 6, 12].



Obr. 1.4: Molekula polyetyleny [12-13]

Hustota polyetylenů závisí zejména na linearitě, resp. větvení řetězců. Na Obr. 1.5 je vidět, že nízko-hustotní polyetylen (LDPE) je složen z rozvětvených řetězců s různou délkou postranních větví, kdežto vysoko-hustotní polyetylen (HDPE) má řetězce lineární (Obr. 1.6) [6, 12].



Obr. 1.5: Strukturální řetězec LDPE [5, 12]



Obr. 1.6: Strukturální řetězec HDPE [5, 12]

Stejně jako hustota i krystalinita je závislá na větvení řetězců, jelikož segmenty řetězců tvoří krystalické oblasti, jejichž četnost a rozloha se zvětšuje se zvětšující se lineárností řetězců. Z toho vyplývá, že vysoko-hustotní polyetylen má v porovnání s nízko-hustotním nejen vyšší hustotu, ale i krystalinitu (Tab. 1.1) [6-7].

Tab. 1.1: Základní charakteristika polyetylenů [2, 6-7, 12]

Vlastnost	LDPE	HDPE
Hustota [ $\text{g/cm}^3$ ]	918 - 935	935 - 965
Krystalinita [%]	40 - 50	60 - 80
Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	115	130
Mez pevnosti v tahu [MPa]	< 10	< 25

Při běžných teplotách jsou polyetyleny odolné proti vodě, neoxidujícím chemikáliím včetně polárních rozpouštědel, kyselin, zásad, solí a jejich roztokům. Chemická odolnost se zvyšuje s rostoucí krystalinitou [5-6].

Z hlediska mechanických vlastností mají polyetyleny nízkou tuhost, jsou houževnaté, odolné proti opotřebení a jejich pevnost roste s rostoucí krystalinitou. Vzhledem k jejich nepolárnímu charakteru mají polyetyleny velmi dobré elektrické vlastnosti a lze je použít jako elektrické izolanty [5, 12].

Polyetyleny jsou nejvíce používané termoplasty. Největší uplatnění nacházejí v potravinářském průmyslu jako obaly, lahve, sáčky a tašky. V automobilovém průmyslu jsou používány pro výrobu izolací kabelů, palivových nádrží a kanystrů. Dále se používají pro výrobu trubek podlahového vytápění, rozvodu pitné vody a jako odpadní trubky [2, 5, 12].

## 1.2 Ozařování polymerů

Ozařování materiálů je technologie používaná od konce druhé světové války, kdy došlo k vývoji jaderného reaktoru. Její prvotní využití byla zejména sterilizace zdravotnických výrobků a pomůcek; nicméně po objevení pozitivního účinku na polymerní materiály došlo k jejímu rozšíření i do plastikářského průmyslu [14-16].

### 1.2.1 Typy záření

Existuje mnoho typů různých záření použitelných v odlišných průmyslových odvětvích. V plastikářském průmyslu patří mezi nejpoužívanější ionizující a iontové záření [17-18].

#### *Iontové záření*

Iontový paprsek je typ částicového paprsku obsahujícího ionty. Vysoké energie je dosaženo pomocí částicového urychlovače – cyklotronu. Tento typ záření se v největší míře používá při výrobě polovodičových součástek a při tvrzení povrchů kovů. Kvůli své velmi nízké hloubce průniku je jeho použití v plastikářském průmyslu omezeno zejména na úpravu povrchů polymerů a na úpravu tenkých filmů [17, 19].

#### *Ionizující záření*

Nejpoužívanějším typem záření je ionizující záření. Můžeme jím upravovat fyzikální, chemické a biologické vlastnosti ozářených materiálů. Hlavní aplikací tohoto typu záření je sterilizace zdravotnických pomůcek, potravin a zemědělských produktů a taktéž modifikace vlastností různých materiálů. S ohledem na úpravu vlastností polymerních materiálů se používají tři hlavní typy ionizujícího záření – rentgenové, gama a beta (elektronové) záření. I přes podstatné rozdíly mezi jednotlivými typy záření, u všech dochází k předávání energie atomům ozařovaného materiálu [17, 19-20].

Celková dosahovaná energie se vyjadřuje v elektronvoltech (eV), kiloelektronvoltech (keV) a zejména v megaelektronvoltech (MeV). Jeden elektron volt je roven energii  $1,602 \times 10^{-19}$  J [17].

V případě, že předaná energie dopadajícího ionizujícího záření je dostatečně velká, tak dojde k vyhození daného elektronu z atomového obalu a atom je tak ionizován. V případě, že je tato energie nízká, tak je daný elektron tzv. povýšen na vyšší energetickou úroveň, což má za následek excitaci. Pro většinu molekul platí, že ionizace nastane v případě, že energie dopadajícího záření je vyšší než 15 eV, přičemž průmyslové zářiče pracují s energiemi v rozsahu 100 eV – 10 MeV. Z toho vyplývá, že převažující reakcí je ionizace [17, 19-20].

Množství dopadajícího záření (radiace) je udávané jako tzv. radiační dávka. Je definovaná jako energie absorbovaná ozářeným materiálem na jednotku hmoty,

jednotkou dávky je gray (Gy). Jeden gray je jednotka soustavy SI a je roven energii jednoho joulu na kilogram hmoty ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ). Při modifikacích polymerů jsou používány dávky v hodnotách kilograyů (kGy) a pro měření velikosti záření jsou používány tzv. dozimetry [17, 20-21].

Tab. 1.2: Příklad velikostí dávek záření pro různé aplikace [20]

Aplikace	Potřebná dávka [kGy]
Sítování kabelů a drátů	30 - 200
Výroba teplem smřštitelných výrobků	50 - 100
Degradace polytetrafluoretylenu (PTFE)	500 - 1500
Předvulkanizace pneumatik	15 - 50
Sítování polymerních pěn	20 - 50
Dezinfekce vody	0,5 - 1
Příprava hydrogelů	50 - 100

## 1.2.2 Typy ionizujícího záření

### *Rentgenové záření*

Rentgenové záření je formou elektromagnetického záření (fotony) s vlnovou délkou od 10 do 0,01 nm. Dle velikosti dosahované energie jej dělíme na měkké (0,12 – 12 keV) a tvrdé (12 keV – 120 keV). Rychlost ozařování je 0,27 kGy/s. Možnosti úpravy vlastností materiálů jsou kvůli nízké energii rentgenového záření velmi omezené, a proto je toto záření primárně používáno pro diagnostiku v medicíně a krystalografii. V omezené míře se může používat i pro sterilizaci potravin jako náhražka gama záření, dále se používá pro diagnostiku vad pneumatik, svarů a vlákný zesílených kompozitů. Materiály vystavené rentgenovému záření nevykazují zbytkovou radiaci [17, 19-20, 22].

### *Gama záření*

Gama paprsek je tvořen proudem elektromagnetické energie (fotony). Fotony mají nejvíce energie z celého elektromagnetického spektra, přičemž gama paprsky vyzařované ze stejného zdroje mají vždy stejnou energii. Dosahovaná energie se pohybuje v rozsahu 100 keV – 1 MeV. Zdrojem záření jsou radioaktivní izotopy, které na rozdíl od jiných typů ionizujícího záření nemohou být vypnuty, ale pouze odstíněny. V technické praxi jsou nejpoužívanějšími kobalt 60 ( $^{60}\text{Co}$ ), cesium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) a iridium 192 ( $^{192}\text{Ir}$ ). Poločas rozpadu všech tří zdrojů se velmi liší ( $^{60}\text{Co}$  – 5,3 let,  $^{137}\text{Cs}$  – 30 let,  $^{192}\text{Ir}$  – 74 dní). Rychlost ozařování je velmi nízká ( $2,8 \times 10^{-3}$  kGy/s), hloubka penetrace je vyšší než u elektronového záření a v materiálu nevzniká zbytková radiace. Tento typ záření se kvůli své nižší energii a dlouhým dobám ozařování používá zejména pro sterilizaci ve zdravotnictví,



v potravinářském průmyslu, ale taktéž pro léčbu rakoviny. V plastikářském průmyslu je jeho použití omezeno zejména na velkoobjemové výrobky [17, 19-20, 23].

### *Elektronové záření*

Elektrony jsou generovány ve vysokém vakuu žhavenou katodou. Elektronový paprsek poté vzniká urychlením proudu těchto elektronů elektromagnetickým nebo elektrostatickým polem umístěným mezi katodu a anodu. S rostoucí energií elektronů roste hloubka průniku do materiálu, přičemž hloubka dále závisí na hustotě ozařovaného materiálu, geometrii výrobku a také jeho obalu. Průmyslové elektronové urychlovače jsou děleny dle dosahované energie na nízko-energetické (80 – 30 keV), středně energetické (300 keV – 5 MeV) a vysoce-energetické (>5 MeV); nicméně kvůli nebezpečí vzniku velkého množství radiace se v průmyslu více než 15 MeV nepoužívá. U materiálů ozářených energií 10 MeV a nižší je zbytková radiace zanedbatelná. Elektronové záření má největší vliv na změnu vlastností ozařovaného materiálu. Rychlost ozařování je oproti gama záření mnohem vyšší (100 kGy/s), ale hloubka průniku je mnohem nižší (až 5x v porovnání s gama zářením). Díky vyšší rychlosti ozařování jsou výrobky vystaveny záření pouze v řádu sekund (oproti hodinám až dnům v případě gama záření); nicméně díky nižší hloubce průniku je někdy potřeba ozařovat z více stran. Elektronové záření je pro své výše popsané charakteristiky nejpoužívanějším zářením určeným pro modifikaci polymerů [17, 20-21, 24-26].

*Tab. 1.3: Srovnání jednotlivých typů ionizujícího záření [17, 20]*

Vlastnost	Gama záření	Elektronové záření	Rentgenové záření
Hloubka průniku	velká	nízká	velká
Výkon	nízký	vysoký	nízký
Rychlost záření	nízká	vysoká	nízká
Zdroj	radiaktivní izotop, nelze vypnout	elektřina, lze vypnout	elektřina, lze vypnout
Stínění	nutné	nutné	nutné
Provozní náklady	vysoké	nízké	vysoké

### **1.2.3 Typy reakcí**

Vlivem ionizace/excitace a následném vzniku volných radikálů, dochází u polymerních materiálů vystavených ionizačnímu záření k různým reakcím:

- Síťování řetězců – spojení řetězců a tvorba sítě,
- Štěpení řetězců – degradace materiálu a snížení molekulové hmotnosti,
- Rozvětvení řetězců – předstupeň síťování,
- Roubování řetězců – připojení nového monomeru k základnímu řetězci,
- Polymerace – při ozáření monomerů/oligomerů [17, 19-20].

Síťování a štěpení řetězců jsou dvě hlavní reakce, které probíhají současně. To, která z nich převažuje, závisí na chemické struktuře daného materiálu [17, 20].

Tab. 1.4: Klasifikace materiálů dle reakce na záření [14-15, 17, 20]

Síťování řetězců	Štěpení řetězců
Polyetylen	Polytetrafluoretylen
Polyester	Polypropylen
Polyvinylchlorid	Polyamid
Polyvinylalkohol	Polymetylmetakrylát
Polyvinylacetát	Polyoxymetylen
Polybutadien	Polyisobutylem
Polychloropren	Polyvinylbutaryl
Polyuretan	Polyakrylonitril
Polyakrylát	Celulóza
Polysulfon	Polypropylensulfid
Přírodní kaučuk	Polyetylensulfid

#### Štěpení řetězců

Štěpení řetězců vlivem radiace vede ke snížení molekulové hmotnosti, což má u většiny materiálů obvykle za následek zhoršení mechanických vlastností, a proto se někdy používá termín degradace. Nicméně existují aplikace, u nichž je snížení molekulové hmotnosti, resp. štěpení řetězců daného materiálu žádoucí. Například při přípravě prášků z polytetrafluoretylenu (PTFE) dochází vlivem snížení molekulové hmotnosti ke zvětšení křehkosti, čímž je možné tento materiál rozemlít na mnohem jemnější částice a získat tak velmi jemný prášek. Dalším příkladem pozitivního využití degradace je úprava tokového chování. Například u polypropylenu (PP) lze vlivem štěpení řetězců zvýšit pevnost taveniny a zlepšit tak zpracovatelnost například vytlačováním [16-17, 20, 24, 27].

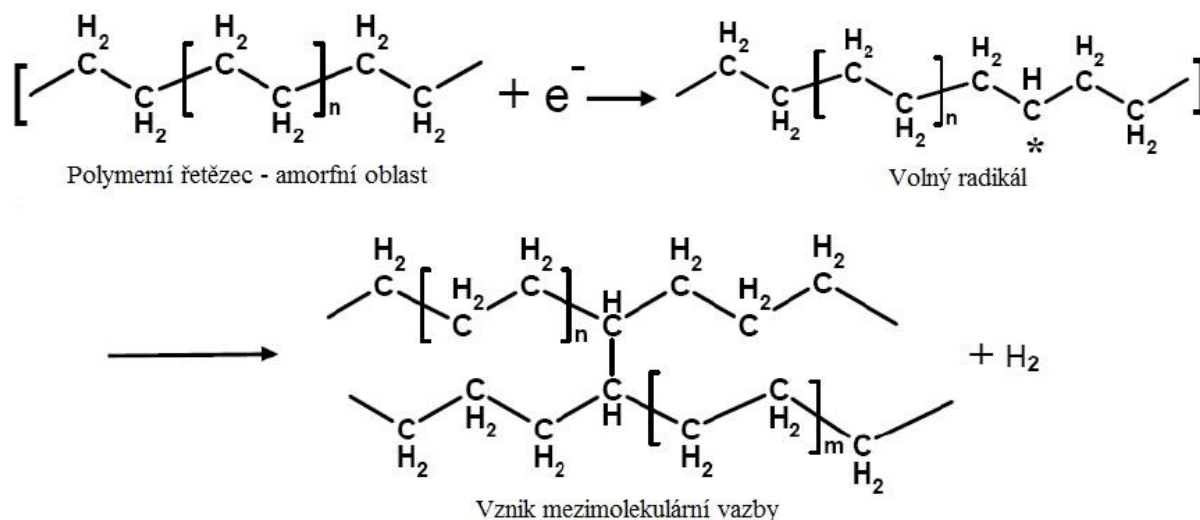
#### Síťování řetězců

Radiačním síťováním řetězců se rozumí proces spojování jednotlivých polymerních řetězců a tvorba prostorové sítě za současného růstu molekulové hmotnosti. Radiační síťování se používá zejména pro modifikaci termoplastů, ale může být použito i pro síťování elastomerů a některých typů termoplastických elastomerů. Síťování termoplastů velmi výrazně ovlivňuje zejména mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a tepelnou stabilitu a vlivem tvorby sítě je nelze opětovně roztavit. Materiály vystavené radiaci mohou síťovat samy o sobě, anebo je nutné pro iniciaci síťování používat tzv. polyfunkční monomery. Původně „nesíťovatelné“ materiály tak mohou s jejich pomocí síťovat (např. polyamid nebo polypropylen). [17, 20, 28-30].

### 1.2.4 Radiační síťování polyetylenů

Polyetyleny jsou materiály, které po vystavení ionizujícímu záření síťují, přičemž jejich ozařování je dobře zavedenou technologií aplikovanou v průmyslu po desetiletí. Polyetyleny se v průmyslu používají pro mnoho různých aplikací od izolace kabelů přes obaly potravin až po zdravotnické výrobky. U mnoha z nich jsou stále rostoucí požadavky na zlepšení vlastností při zachování poměrně nízké ceny. Radiační síťování je proto žádoucí proces s ohledem na zlepšení hlavně tepelných (odolnost proti stárnutí, rozměrová stabilita), mechanických (pevnost, odolnost proti opotřebení) a chemických vlastností (odolnost proti botnání, rozpustnost) [27-28, 31-33].

Strukturní jednotky řetězce polyetyleny jsou tvořeny opakující se vazbou  $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$  (Obr. 1.4). Působením ionizačního záření dojde u jednotlivých řetězců k odtržení atomů vodíku z těchto vazeb, čímž nastane vznik volných radikálů. Jejich následnou rekombinací dojde u sousedních řetězců k vytváření chemických vazeb (vazba C-C) a vzniku prostorové sítě. U odtržených atomů vodíku dojde k vzájemným reakcím a vzniku molekul vodíku  $\text{H}_2$ . (viz. Obr. 1.7) [22, 34-35].



Obr. 1.7: Proces tvorby sítě u polyetyleny [22]

Vzdálenost mezi jednotlivými řetězci v amorfni části polyetyleny je 0,154 nm, zatímco v krystalické části je 0,41 nm. Vzdálenost mezi řetězci v krystalické části je tedy příliš velká a jejich pozice je příliš pevně fixována na vytvoření rekombinace sousedních řetězců. Z toho vyplývá, že k vytvoření sítě dochází převážně v amorfni části a na její hranici [17, 19-20, 32, 36].

Při síťování polyetylenů dochází taktéž ke tvorbě značného množství tzv. gelu (60 – 100 %), díky němuž je nemožné takto modifikovaný materiál opětovně roz-tavit. Dalším nežádoucím účinkem je ovlivnění barvy výsledného produktu udávané tzv. indexem žlutosti (YI – yellowness index) [19, 21, 30].

### 1.2.5 Aplikace radiačního síťování polyetylenů

Radiační síťování polyetylenů umožňuje využití těchto materiálů i v oblastech a prostředích, kde to bylo dříve nemyslitelné:

- trubky a potrubní systémy – zvýšená teplota a vyšší vnitřní tlak proudící tekutiny,
- obaly – nižší tloušťka stěny, není nutná bariérová vrstva,
- izolace drátů a kabelů – vyšší elektrické proudy, menší radiusy záhybů, není nutné kovové pouzdro,
- teplem smrštitelné výrobky – možnost ohřevu i nad původní teplotu tavení a dosažení vyšší roztažnosti,
- pěnové izolační materiály – vyšší teplota roztažnosti a snazší ovládní procesu expanze,
- ortopedická zařízení – vyšší odolnost opotřebení povrchových vrstev,
- dráty a kabely – vyšší teplotní odolnost [20, 31, 34, 37].

### 1.2.6 Radiačně zesíťované polyetylenové trubky (PEX trubky)

Jednou z hlavních aplikací radiačního síťování polyetylenů je při výrobě tzv. PEX trubek, používaných pro různé potrubní systémy a podlahové vytápění. Tyto trubky v průmyslu čím dál více nahrazují tradiční měděné nebo ocelové trubky zejména díky nižší hmotnosti, vyšší odolnosti proti korozi a nižší ceně. V dnešní době jsou téměř všechny PEX trubky vyrobeny z vysokohustotního polyetylenu (HDPE) [17, 20, 30].

V průmyslu se používají dvě metody pro radiační síťování polyetylenových trubek. Jedná se o statickou metodu, u níž je trubka ozařována ze dvou stran a metodu dynamickou, kdy daná trubka rotuje kolem své osy při průjezdu elektronovým urychlovačem [17, 20].

Vlivem ozáření lze tyto trubky bez potíží používat při teplotách 95 °C a tlacích 0,65 MPa. Mezi další zlepšené vlastnosti patří například:

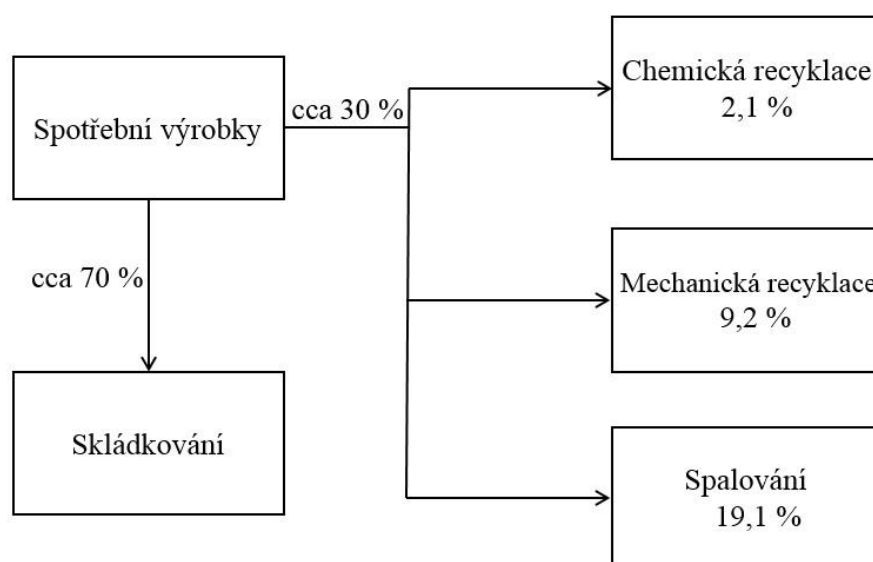
- tepelná odolnost,
- odolnost proti praskání,
- tuhost a pevnost za vyšších teplot,
- odolnost proti chemikáliím,
- odolnost proti abrazi,
- odolnost proti botnání [17, 20].

Vzhledem k výše popsaným vlastnostem je pouze v Německu ročně vyrobeno cca 80 milionů metrů PEX trubek a například v Japonsku tvoří jejich produkce cca třetinu trhu [20, 31].

### 1.3 Recyklace polymerů

Rostoucí spotřeba a popularita polymerních materiálů jak v průmyslových odvětvích, tak v domácnostech vyžaduje zvýšenou pozornost zejména s ohledem na zvětšující se produkci odpadu z těchto materiálů. Jenom v Západní Evropě bylo v roce 2005 „vytvořeno“ 43,5 milionu tun odpadu z plastů. Technologie zpracování polymerních odpadů musí být šetrné k životnímu prostředí a zároveň ekonomicky výhodné, proto je v dnešní době snaha omezovat použití plastových výrobků, což se ukazuje být obtížným úkolem. Navzdory relativně problematické recyklaci by náhrada plastů jiným materiálem byla ekonomicky a ekologicky nevýhodná. Nahrazení například plastových obalů papírem, kartonem, nebo sklem by vedlo ke zvýšení jejich hmotnosti až o 400 %, ceně o 200 % a energetické náročnosti výroby o 200 % [2, 38-39].

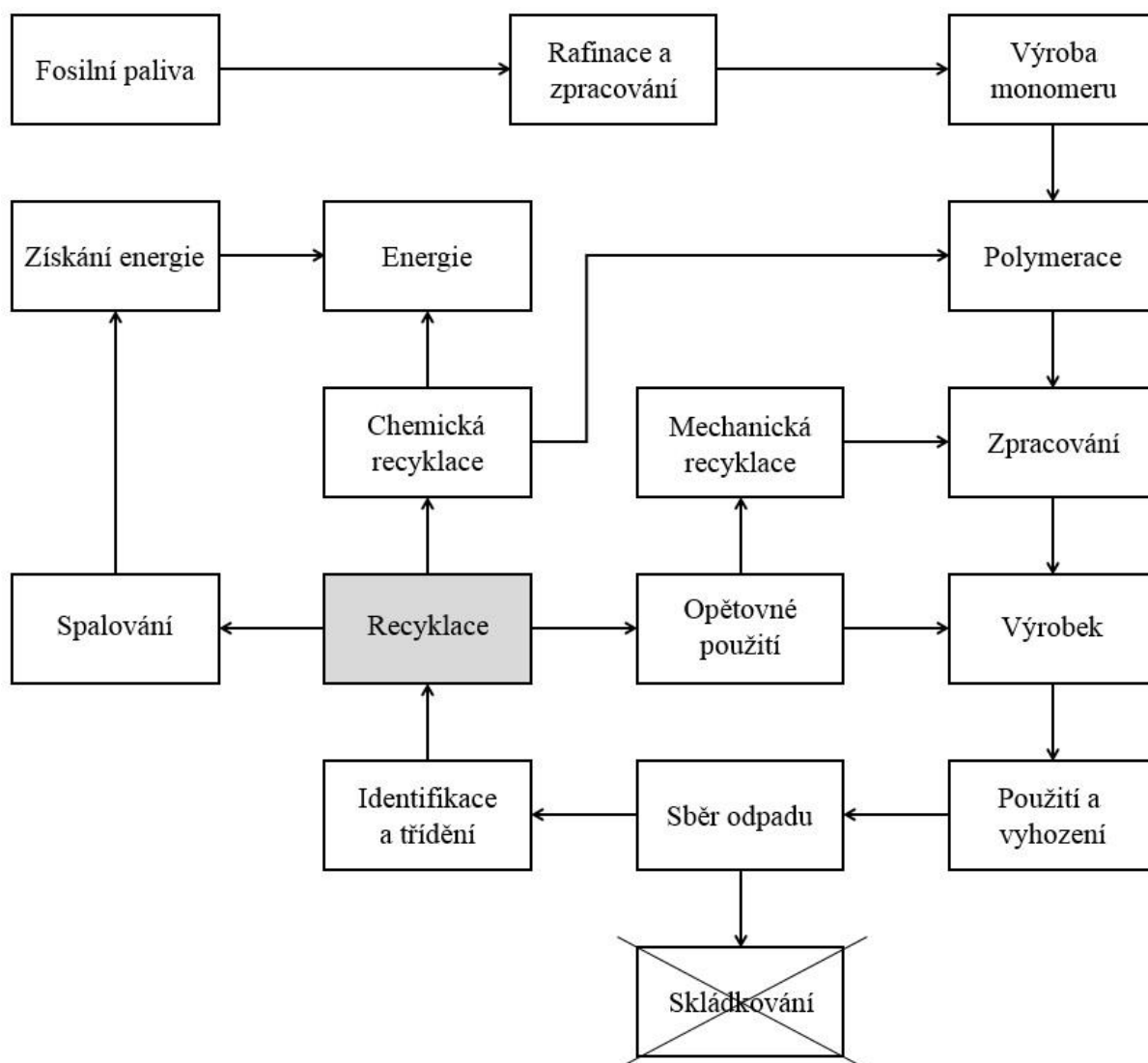
V současnosti je v Západní Evropě recyklováno pouze zhruba 30 % spotřebních výrobků z plastů a zbytek končí na skládkách (viz. Obr. 1.8). Tento trend má negativní dopad na životní prostředí, a proto je snahou zvyšovat podíl recyklace [2, 38].



Obr. 1.8: Podíl recyklace u spotřebního zboží [2, 38]

Při recyklaci polymerů je nutné brát do úvahy jejich rozdílnou chemickou strukturu a vlastnosti, což znemožňuje použití univerzální metody pro jejich recyklaci. V dnešní době jsou používány tři základní přístupy. Prvním způsobem snižování polymerního odpadu je opětovné používání například obalů (PET lahve, tašky, sáčky atd.), které není nutné vyhazovat po jednom použití. Tento způsob je aplikován v praxi například při výrobě čistících prostředků a detergentů. Druhý a třetí způsob se už nezabývá prevencí proti vzniku odpadu, ale samotným zpracováním už vzniklých odpadů. Jedná se o recyklaci, neboli určitou úpravu materiálu a vrácení do životních cyklu. Tento proces se používá zejména u druhotných aplikací díky snížené kvalitě takto použitých materiálů. Recyklace se dále dělí na mechanickou a chemickou. Posledním způsobem je získávání určité formy

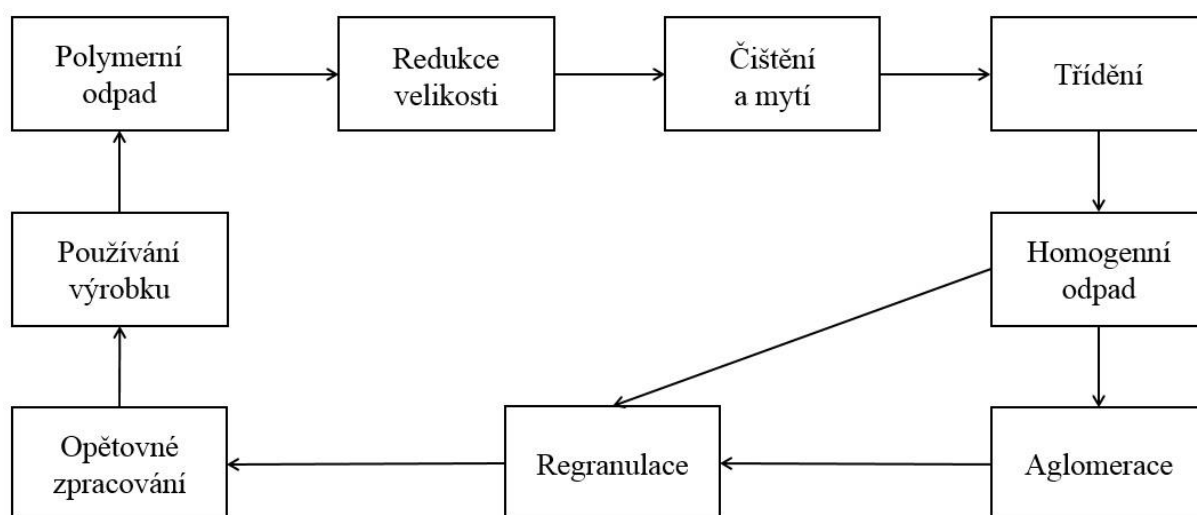
energie spalováním polymerů. Jedná se zároveň o nejjednodušší způsob, protože nejsou kladeny vysoké nároky na čištění a třídění spalovaného odpadu [38-39].



Obr. 1.9: Životní cyklus plastového výrobku [40]

### 1.3.1 Mechanická recyklace

Mechanická neboli také materiálová recyklace spočívá v opětovném zpracování polymerního odpadu na nový výrobek, při zachování základní makromolekulární struktury. Mechanická recyklace se dělí na primární a sekundární. Primární, neboli tzv. „in house“ spočívá v tom, že je vzniklý polymerní odpad okamžitě vrácen ke zpracování, aniž by opustil výrobní halu (například vtokové zbytky při vstřikování termoplastů). Tento typ recyklace se dá aplikovat pouze při opětovném zpracování čistých materiálů bez jakýchkoliv přísad a příměsí. Na druhou stranu sekundární typ mechanické recyklace se používá při zpracování znečištěných a plněných materiálů a materiálů z externích zdrojů. Z toho důvodu tento typ sestává z několika nezbytných technologických kroků vedoucích k opětovnému zpracování (viz. Obr. 1.10) [2, 12, 39].



Obr. 1.10: Technologický postup mechanické recyklace [2, 12]

### *Redukce velikosti*

Materiál určený k recyklaci může být dodán v různých velikostech, a proto je z důvodu dalšího zpracování nutné jeho rozměry sjednotit. Redukce velikosti je dvou-stupňový proces, při kterém je materiál nejprve nadrcen na částice o velikosti 25 – 50 mm. Poté následuje jemnější mletí v nožovém mlýnu. Výsledná velikosti částic je obvykle 5 x 5 mm, nicméně vždy záleží na velikosti ok použitého síta a následném zpracovatelské procesu [2, 12].

### *Čištění a mytí*

Čištění je proces nezbytný pro odstranění špíny, usazenin, etiket, lepidel a například barev ulpěných na recyklovaném materiálu. Proces čištění výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného recyklátu, stejně jako účinnost následného třídění. Čištění probíhá ve dvou fázích. Nejprve je materiál umyt a zbaven různých nečistot a následně je sušen. Sušení probíhá nejčastěji za pomoci horkého vzduchu [2, 12].

### *Třídění*

Vlivem problematické kompatibility jednotlivých typů polymerních materiálů je třídění jednou z nejdůležitějších operací přípravy recyklátu před opětovným zpracováním. Samotné třídění probíhá do jisté míry už při sběru polymerního odpadu, kdy jsou jednotlivé kontejnery označeny dle dané kategorie materiálu (Obr. 1.11). Nicméně i přes to je materiály nutné dodatečně roztřídit, jelikož i malé množství příměsi jiného materiálu může velmi výrazně ovlivnit vlastnosti výsledného recyklátu. Dodatečné třídění probíhá na základě různých materiálových vlastností. Materiály mohou být tříděny dle hustoty, povrchových vlastností, elektrické vodivosti, optických a chemických vlastností anebo barvy [2, 12, 38].



Obr. 1.11: Třídění plastů dle kategorie [2, 38]

### *Aglomerace a regranulace*

Hlavním účelem aglomerace je v případě nutnosti zvýšit sypnou hmotnost částic a vytvořit tzv. aglomerát, který se následně snadněji dávkuje do plastikační jednotky stroje. Aglomeraci, případně následnou regranulaci je nutné zařadit do procesu zpracování polymerních odpadů zejména při recyklaci tenkých výrobků, jako např. sáčků a tašek, které mají tendenci po rozemletí tvořit tzv. vločky [2].

Nevýhodou mechanické recyklace je určité zhoršení vlastností výsledného recyklátu vlivem jeho degradace. Ta může nastat působením vnějších vlivů, jako například UV záření, během používání daného výrobku anebo tepelným ovlivněním během opětovného zpracování. Z toho důvodu se výrobky s podílem recyklátu nesmí používat v potravinářském a zdravotnickém průmyslu. Mezi možné aplikace patří výroba nákupních tašek, vícevrstvé struktury, lavičky, ploty, patníky atd. [2, 38-39].

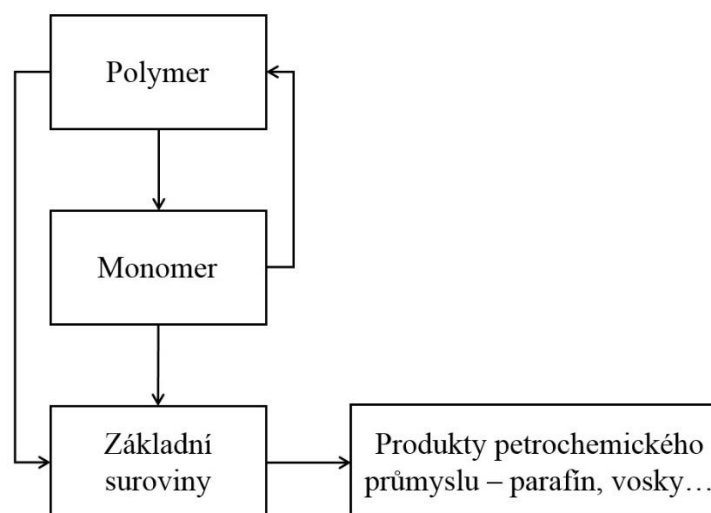
Mechanická recyklace se primárně používá u termoplastů, které lze opětovně tavit; nicméně lze ji využít i při recyklaci reaktoplastů a elastomerů, které opětovně tavit nelze. Princip spočívá v tom, že se daný recyklát používá jako plnivo za účelem snížení nákladů, hmotnosti, nebo úpravy vlastností výsledného produktu, ale velmi záleží na vzájemné kompatibilitě [2].

### **1.3.2 Chemická recyklace**

Chemická recyklace spočívá v rozkladu původního polymerního materiálu působením tepla, chemických činidel a různých katalyzátorů. Jejím účelem je opětovné získání základních surovin, které mohou být použity zejména při přípravě nových polymerů, jiných chemikálií a dalších výrobků petrochemického průmyslu. Z toho důvodu se tento způsob nazývá také recyklací surovin (Obr. 1.12) [2, 38-39].

Nezbytným krokem před samotnou chemickou recyklací je, podobně jako u mechanické recyklace, čištění a třídění. Tímto krokem jsou z materiálu odstraněny halogeny, těžké kovy a plniva, které by touto technologií nešlo zpracovat. V průmyslu existuje několik kategorií chemické recyklace, které se od sebe liší jak samotným způsobem recyklace, tak výsledným produktem [2, 38-39].





Obr. 1.12: Chemická recyklace [2]

### Chemická depolymerizace

Nejdéle používanou metodou chemické recyklace je depolymerizace, u níž dochází k rozkladu původního polymeru na základní monomer, za použití určitých typů chemických činidel. Výhodou je, že vlastnosti získaného monomeru jsou plně srovnatelné s vlastnostmi nově vyráběných monomerů. Nevýhodou je, že ji lze použít pro rozklad pouze polymerů vyrobených polykondenzací (polyestery, polyamidy atd.), které tvoří jen cca. 15% podíl celkového množství polymerních odpadů [2, 38].

### Zplyňování

Proces zplyňování je založen na částečném spalování (při teplotách 800 – 1600 °C) za přítomnosti kyslíku ve formě vzduchu, páry, nebo ve své čisté podobě. Výsledným produktem je syntetický zemní plyn (syngas – směs CO a H<sub>2</sub>), který lze použít například jako palivo, nebo při výrobě metanolu a amoniaku. Tato technologie je výhodná zejména proto, že není nutné třídít různé polymerní materiály, ale lze je zpracovat společně. Na druhou stranu ekonomická výhodnost zplyňování velmi závisí na možných aplikacích vzniklého syntetického zemního plynu a na jeho tržní hodnotě [2, 12, 38].

### Pyrolýza

Chemická recyklace pyrolýzou je tepelný rozklad polymerního odpadu bez přítomnosti kyslíku, přičemž hlavním produktem jsou suroviny pro výrobu polyolefinů, vosky a oleje. Pyrolýza se dělí na nízko-teplotní (450 – 600 °C) a vysokoteplotní (750 – 950 °C). Hlavní výhodou je, že nejsou kladeny téměř žádné nároky na třídění a čistotu polymerního materiálu. Nevýhodou je nízká tepelná vodivost polymerů a z toho plynoucí vysoká energetická náročnost tepelného rozkladu [2, 12].

### *Katalytické krakování*

Rozklad polymerního materiálu je u katalytického krakování způsoben účinkou určitého katalyzátoru a tepla. Výhodou oproti jiným tepelným metodám chemické recyklace je relativně krátká doba rozkladu polymerního odpadu, nízká tepelná náročnost procesu (cca 200 °C) a vysoká kvalita získaných surovin. Oproti tomu nevýhodou je omezená použitelnost (zejména pro polyolefiny) a vysoké nároky na čistotu recyklátu [38].

### *Hydrogenace*

Principem této metody chemické recyklace je tepelný rozklad za přítomnosti vodíku bez nutnosti třídění polymerního odpadu. Výsledným produktem je vysoce kvalitní syntetický olej; nicméně nevýhodou je vysoká cena vodíku a nutnost vysokých zpracovatelských tlaků [2, 12, 38].

I přes nesporné výhody chemické recyklace, jsou její velmi vysoká energetická náročnost a naopak velmi nízká ekonomická výhodnost hlavními faktory jejího relativně malého rozšíření při recyklaci polymerních materiálů [38-39].

### **1.3.3 Spalování**

Základní podmínkou pro využití recyklace je, že energie potřebná pro samotný proces recyklace je nižší než energie potřebná na výrobu nového výrobku. V opačném případě není recyklace přínosná a materiál je výhodnější spálit [12, 38].

Technologie spalování odpadu je používána již od roku 1895; nicméně teprve v roce 1990 byly vyvinuty dostatečně účinné spalovny s kvalitní filtrací spalin a škodlivých plynů, umožňující spalovat i jinak nebezpečné materiály. Princip spočívá v tom, že odpad z polymerních materiálů je kontrolovaně spálen a vzniklá tepelná energie je dále průmyslově využita (zejména pro výrobu elektřiny a ohřev vody). Průměrná výhřevnost polymerních materiálů je cca 35 MJ/kg, což je více než dvojnásobek oproti papíru (16 MJ/kg) a více než desetinásobek oproti organickému odpadu (3 MJ/kg). Jedná se o nejjednodušší způsob zpracování polymerních odpadů, protože spalovaný polymerní materiál nemusí být tříděn ani nijak čištěn [2, 39].

Tento způsob je nejčastěji používán při zpracování odpadů z radiačně zesíťovaných materiálů; nicméně nabízí se možnost jejich mechanické recyklace a využití jako plniva, podobně jako při recyklaci některých typů reaktoplastů a elastomerů.

## 2 CÍL PRÁCE

Rostoucím použitím ozařování pro modifikaci polymerních materiálů vyvstává otázka opětovného použití takto upravených materiálů po skončení jejich životního cyklu. Řada studií se zabývala možnostmi využití ozařování polymerů pro zvýšení vzájemné kompatibility při přípravě směsí s podílem recyklátu, ať už většinou případů formou aktivace určitých kompatibilizátorů, nebo formou přímé úpravy povrchových vlastností recyklátu [41-45]. Další studie diskutovali problematiku použití ozařování pro zlepšení vlastností samotných recyklátů nebo směsí s jeho podílem [46-49]. Nicméně nikdo se doposud nezabýval možnostmi opětovného zpracování již ozářených polymerních materiálů.

Cílem disertační práce je tedy navrhnout způsob opětovného zpracování radiálně zesíťovaných polymerních materiálů po skončení jejich životnosti a popsat výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti nově vzniklých materiálů.

### *Postup řešení disertační práce*

- Návrh metody zpracování
- Volba vhodných materiálů
- Příprava recyklátu před zpracováním
- Zpracování recyklátu do požadované formy
- Příprava směsí s různým podílem recyklátu
- Stanovení procesních podmínek
- Výroba zkušebních tělísek vstřikováním
- Popis zpracovatelských vlastností
- Popis mechanických a tepelných vlastností
- Provedení strukturní analýzy
- Vyhodnocení výsledků experimentů a vzájemné porovnání naměřených veličin

### 3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

V disertační práci je zkoumána problematika využití radiačně síťovaných termoplastických materiálů po skončení jejich životního cyklu. Radiační síťování způsobuje mimo jiné ztrátu typické vlastnosti termoplastů – opakované tavitelnosti, a proto vyvstává otázka opětovného využití takto modifikovaných materiálů. Tato problematika není, i přes rostoucí poptávku po takovýchto materiálech, doposud nijak řešena.

Disertační práce je zaměřena na ozářený vysoko-hustotní polyetylen ( $\text{HDPE}_x$ ), který patří mezi nejvíce ozařované materiály, a tudíž je zde obrovský potenciál pro jeho budoucí recyklaci. Tento materiál po ozáření síťuje, stává se tak opětovně netavitelným a nelze jej proto opětovně zpracovat technologiemi běžnými u termoplastů. Nemožnost opakovaného tavení značně limituje možnosti zpracování odpadu z radiačně síťovaných výrobků. Nabízí se však možnost jeho využití jako plniva pro stejné nebo podobné polymery.

V disertační práci byl dále použit nízko a vysoko-hustotní polyetylen (LDPE, HDPE), který tvořil polymerní matrici pro plnivo z recyklovaného radiačně zesíťovaného HDPE ( $\text{rHDPE}_x$ ). Jednotlivé směsi se lišily jak podílem plniva, tak výchozí formou obou složek směsi. Celkově bylo vytvořeno pět základních směsí ve složení uvedeném v Tab. 3.1.

#### 3.1 Použité materiály

Pro přípravu zkušebních těles a studium vlastností nových materiálů s obsahem radiačně síťovaného HDPE bylo využito neshodných výrobků a zbytků z montážních prací vznikajících při výrobě potrubí určeného pro podlahové vytápění, tzv. PEX trubek (Obr. 3.1).



Obr. 3.1:  $\text{HDPE}_x$  trubky pro podlahové vytápění

Trubky byly původně ozářeny elektronovým zářením beta, pro HDPE doporučenou dávkou 165 kGy a energií 10 MeV. Přesný typ tohoto HDPE nebyl z důvodu ochrany „know-how“ výrobce zjištěn.

Jako polymerní matrice bylo použito LDPE typ 780E vyráběný firmou Dow a HDPE typ Tipelin 6300B vyráběný firmou Slovnaft. Tyto materiály byly zvoleny z důvodu dobré zpracovatelnosti, snadné dostupnosti a nízkých pořizovacích nákladů. Materiálové listy obou typů materiálů jsou přiloženy v příloze A a B.

Vlastnosti výsledných směsí byly porovnávány jak s původním nemodifikovaným LDPE a HDPE, tak s radiačně síťovaným HDPE ( $\text{HDPE}_x$ ) ozářeným stejným typem a dávkou záření jako použité plnivo. Ozáření bylo provedeno ve spolupráci s firmou BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG ve vysokonapěťovém urychlovači typu Rhodotron.

### 3.1.1 Zkoumané směsi materiálů

Tab. 3.1: Jednotlivé směsi

Označení	Matrice	Plnivo	Stupeň plnění [%]
A	granulát LDPE	drť $\text{rHDPE}_x$	10, 20, 30, 40, 50, 60
B	granulát LDPE	prášek $\text{rHDPE}_x$	dtto
C	prášek LDPE	prášek $\text{rHDPE}_x$	dtto
D	granulát HDPE	drť $\text{rHDPE}_x$	10, 30, 60
E	granulát HDPE	prášek $\text{rHDPE}_x$	dtto

Podrobněji byly studovány směsi A – C, z důvodu předpokladu výraznějšího zlepšení výsledných vlastností. Tyto směsi byly připravovány v šesti koncentracích od 10 do 60 %. U směsí D a E je předpoklad zlepšení výsledných vlastností nižší, a proto byly připravovány pouze ve třech koncentracích od 10 do 60 %.

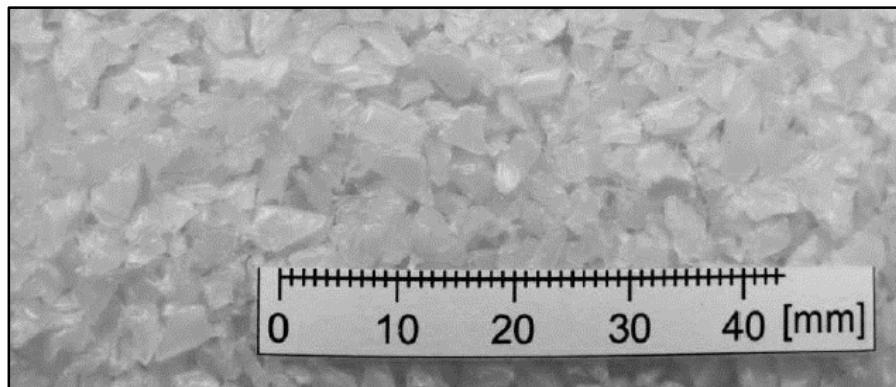
Celkově byly měřeny a porovnávány vlastnosti těchto materiálů:

- Směsi A-E,
- LDPE a HDPE – stejné typy jako matrice v příslušných směsích,
- $\text{HDPE}_x$  – radiačně zesíťovaný HDPE, ozářený stejným typem a dávkou záření jako použité plnivo.

## 3.2 Příprava směsí a zkušebních těles

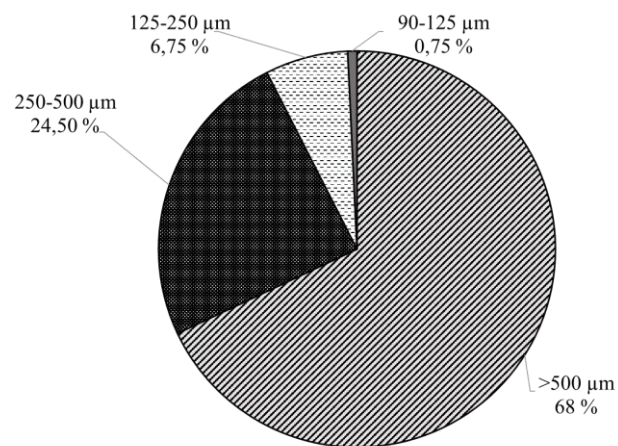
### 3.2.1 Příprava materiálů

V prvním kroku byly dodané trubky (Obr. 3.1) zbaveny nečistot a zkráceny na potřebnou délku. Takto upravené a očištěné trubky byly následně drceny v laboratorním nožovém mlýnu na drť o velikosti částic 3 – 5 mm (Obr. 3.2).



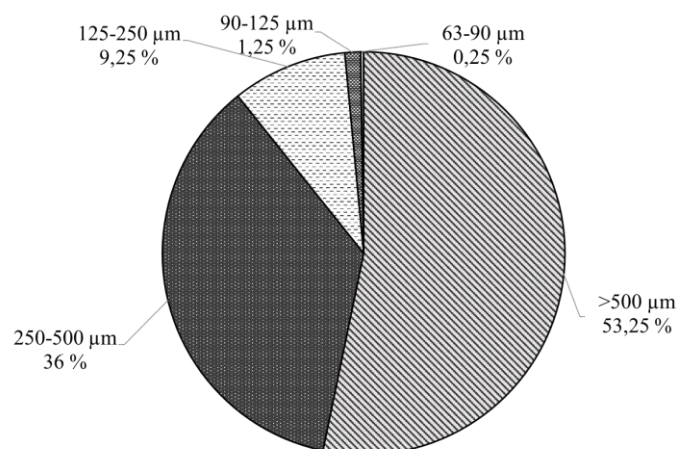
Obr. 3.2: Velikost částic drti rHDPE<sub>x</sub>

Prášková forma materiálů byla dále připravena v externí firmě MEL-BAX Roman Odstrčilík, kde byly materiály podchlazeny a následně mlety v nožových mlýnech na prášek o velikosti částic ~500  $\mu\text{m}$ . Velikost částic byla ověřována síťovou analýzou na vibračním prosévacím stroji Retsch AS 200 Basic.



Obr. 3.3: Velikost částic prášku rHDPE<sub>x</sub>

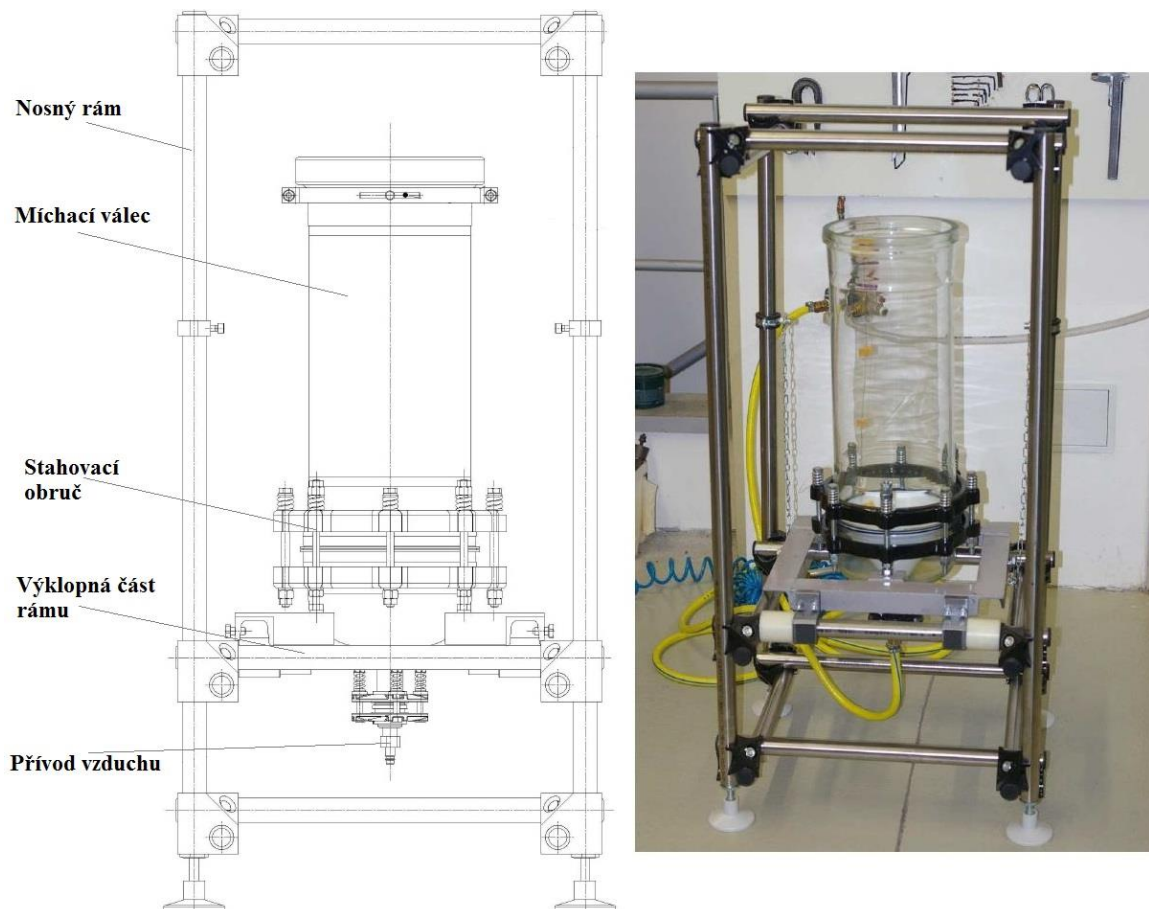
Z Obr. 3.3 je patrné, že u prášku z rHDPE<sub>x</sub> tvořili téměř 70% podíl částice velikosti >500  $\mu\text{m}$ . Zbýlých 30 % má menší rozměr. U LDPE prášku (Obr. 3.4) byl poměr částic velikosti 500  $\mu\text{m}$  a částic menších přibližně stejný.



Obr. 3.4: Velikost částic prášku LDPE

### 3.2.2 Míchání materiálů

Všechny směsi byly míchány v laboratorní fluidní míchačce zkonstruované a zrealizované na Ústavu výrobního inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (Obr. 3.5) [50].

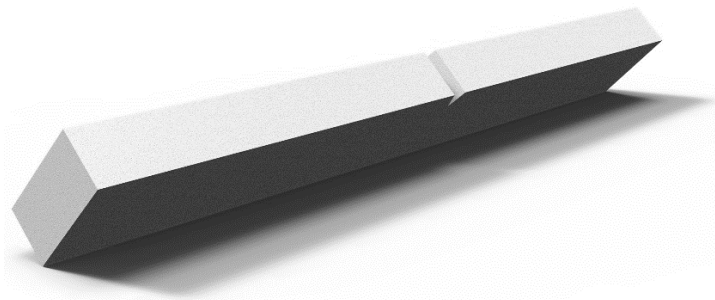


Obr. 3.5: Fluidní míchačka [50]

### 3.2.3 Příprava zkušebních těles

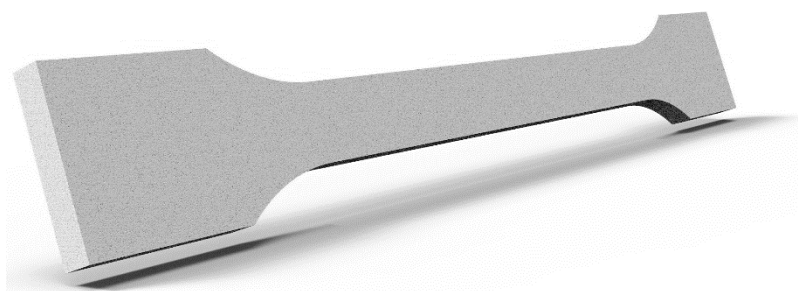
Ihned po míchání byla z připravených směsí zhotovena zkušební tělíska vstřikováním na vstřikovací stroji Arburg Allrounder 420C.

Zkušební tělíska byla vyrobena v jednonásobné vstřikovací formě s dutinou ve tvaru lopatky dle normy ČSN EN ISO 527-2 [51] a tyčinky dle normy ČSN EN ISO 179 [52].



Obr. 3.6: Zkušební tělísco - tyčinka





Obr. 3.7: Zkušební tělísko - lopatka

Procesní parametry původního neplněného LDPE a směsí s LDPE matricí (směsí A až C) byly totožné viz. Tab. 3.2. Výjimku tvořili směsi s 60% koncentrací plniva, u nichž bylo nutno zvyšovat vstřikovací tlak i dotlak z důvodu zhoršení tokových vlastností (viz. hodnota v závorkách).

U původního neplněného HDPE a směsí s HDPE matricí (směsí D a E) byla situace obdobná. U nejvyšší koncentrace plnění bylo nutno zvyšovat hodnoty vstřikovacího tlaku a dotlaku (viz. hodnota v závorkách).

Tab. 3.2: Procesní parametry jednotlivých směsí

Vstřikovací parametry	Materiál	
	směsi A-C, LDPE	směsi D-E, HDPE
Vstřikovací rychlost [mm/s]	60	60
Vstřikovací tlak [MPa]	45 (55)	80 (100)
Doba chlazení [s]	30	20
Teplota formy [°C]	40	40
Doba dotlaku [s]	10	25
Velikost dotlaku [MPa]	40 (55)	60 (85)
Teploty pásem plastikační jednotky		
Pásmo 1 [°C]	135	200
Pásmo 2 [°C]	140	215
Pásmo 3 [°C]	150	220
Pásmo 4 [°C]	160	235
Pásmo 5 [°C]	180	250
Teplota pod násypkou [°C]	40	60

### 3.3 Provedené zkoušky

Práce se zaměřuje na popis mechanických, tepelných a zpracovatelských vlastností všech připravených směsí. Dále jsou výsledky doplněny a podpořeny strukturální analýzou.



### 3.3.1 Mechanické vlastnosti

#### *Zkouška tahem*

Tahové vlastnosti byly měřeny na přístroji ZWICK 1456 za pokojové teploty 23 °C a v teplotní komoře za zvýšené teploty 80 °C. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-1 [53] rychlostí odtahu příčnicku 50 mm/min. Vyhodnocován byl modul pružnosti v tahu  $E$ , mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  a poměrné prodloužení na mezi pevnosti  $\varepsilon_M$ .

#### *Zkouška vrubové houževnatosti*

Vrubová houževnatost byla měřena dle normy ČSN EN ISO 179 [52]. Tělíska byla před zkouškou opatřena vrubem typu C o velikosti 2 mm dle této normy. Měření probíhalo za pokojové teploty 23 °C na přístroji CEAST Resil Impactor Junior. Energie použitého kladiva byla 5 J a vyhodnocovanou veličinou byla maximální vrubová houževnatost  $A_M$ .

#### *Zkouška tvrdosti*

Tvrdoost byla měřena za pokojové teploty 23 °C na přístroji OMAG AFFRI ART 13 dle normy ČSN EN ISO 868 [54]. Měřena a vyhodnocován byla tvrdost Shore D.

#### *Zkouška mikrotvrdoosti*

Měření probíhalo na přístroji Micro Combi Tester od společnosti CSM Instruments. Mikrotvrdoost byla měřena za pokojové teploty 23 °C metodou Depth Sensing Indentation (DSI) dle normy ČSN EN ISO 14577-1 [55] zatěžující silou 1 N po dobu 90 s. Vyhodnocována byla vtisková tvrdost HIT.

### 3.3.2 Tepelné vlastnosti

#### *Zkouška teploty měknutí dle Vicata*

Měření probíhalo na přístroji HDT 6 Vicat CEAST typ 6921 ve spolupráci s Polymerním Institutem v Brně. Zkouška byla provedena v souladu s metodou A normy ČSN EN ISO 306 [56] za pokojové teploty 23 °C. Tělíska byla ohřívána v olejové lázni rychlostí 50 °C/hod.

### 3.3.3 Zpracovatelské vlastnosti

#### *Zkouška indexu toku taveniny*

Index toku taveniny byl měřen na přístroji Dynisco Kayeness LMI 4003 metodou B dle normy ČSN EN ISO 1133 [57]. Teplota válce byla 190 °C, hmotnost závaží 2,16 kg, průměr kapiláry 2,095 mm a vzdálenost mezi ryskami 26 mm.

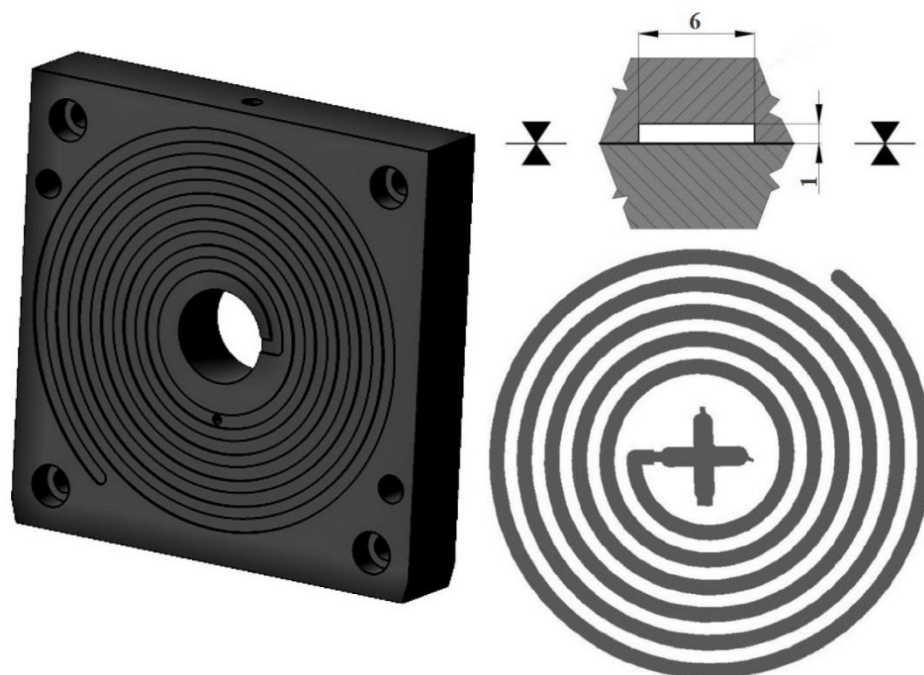
#### *Zkouška zatékavosti*

Zatékavost byla měřena na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420C, kdy byl materiál vstřikován do dutiny ve tvaru Archimédovi spirály (Obr. 3.8). Použitá

metoda a zařízení byli vyvinuté na Ústavu výrobního inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (užitný vzor číslo 2011-23769) [58]. Procesní parametry byly v rámci jedné směsi totožné (Tab. 3.3). Vyhodnocovanou veličinou byla délka zatečení.

Tab. 3.3: Procesní parametry jednotlivých směsí při zkoušce zatékavosti

Vstřikovací parametry	Materiál	
	směsi A-C, LDPE	směsi D-E, HDPE
Vstřikovací rychlost [mm/s]	60	60
Vstřikovací tlak [MPa]	100	130
Doba chlazení [s]	20	20
Teplota formy [°C]	40	40
Doba dotlaku [s]	10	25
Velikost dotlaku [MPa]	80	115
Teploty pásem plastikační jednotky		
Pásmo 1 [°C]	135	200
Pásmo 2 [°C]	140	215
Pásmo 3 [°C]	150	220
Pásmo 4 [°C]	160	235
Pásmo 5 [°C]	180	250
Teplota pod násypkou [°C]	40	60



Obr. 3.8: Spirálová dutina [58]

### 3.3.4 Strukturní analýza

#### *Mikrotomové řezy*

Struktura výsledných tělísek byla zkoumána na příčných řezech o tloušťce 35  $\mu\text{m}$  připravených na rotačním mikrotomu LEICA RM2255. Vyhodnocení struktury bylo provedeno pomocí optického mikroskopu Olympus BX41.

#### *Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)*

Struktura byla zkoumána na lomové ploše dusíkem podchlazených tělísek za použití skenovacího elektronového mikroskopu JEOL 7500F.

## 3.4 Statistické vyhodnocení dat

Statistické vyhodnocení dat bylo provedeno v programu Minitab 14, jejich grafická interpretace pak v programu MS Excel 2013.

V grafech jsou zobrazeny hodnoty reprezentující aritmetický průměr naměřených dat spolu s chybovou úsečkou charakterizující nejistotu měření typu A. Obě veličiny byly vypočítány dle níže uvedených rovnic.

#### *Aritmetický průměr*

Udává odhad střední hodnoty statistického souboru dat. Je definován jako součet hodnot všech proměnných ( $x_i$ ) vydělený celkovým počtem proměnných ( $n$ ) [59-61].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

#### *Nejistota měření typu A*

Vyjadřuje interval, ve kterém se nachází skutečná hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností [59-61].

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (3.2)$$

#### *Směrodatná odchylka*

Udává kvadratický průměr odchylek hodnot  $x_i$  od jejich aritmetického průměru [59-60].

#### *Medián*

Udává 50% kvantil, který člení statistický soubor na dvě stejně četné poloviny [59, 61].

#### *Minimum/maximum*

Udává minimální/maximální naměřenou hodnotu vyskytující se ve statistickém souboru dat [60-61].

## 4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Hodnoty původního nemodifikovaného LDPE, HDPE a HDPE<sub>x</sub> ozářeného stejnou dávkou jako použitý recyklát jsou v grafech tučně zvýrazněny pro snazší odlišení od hodnot zkoumaných směsí.

### 4.1 Směs A - granulát LDPE + drt' rHDPE<sub>x</sub>

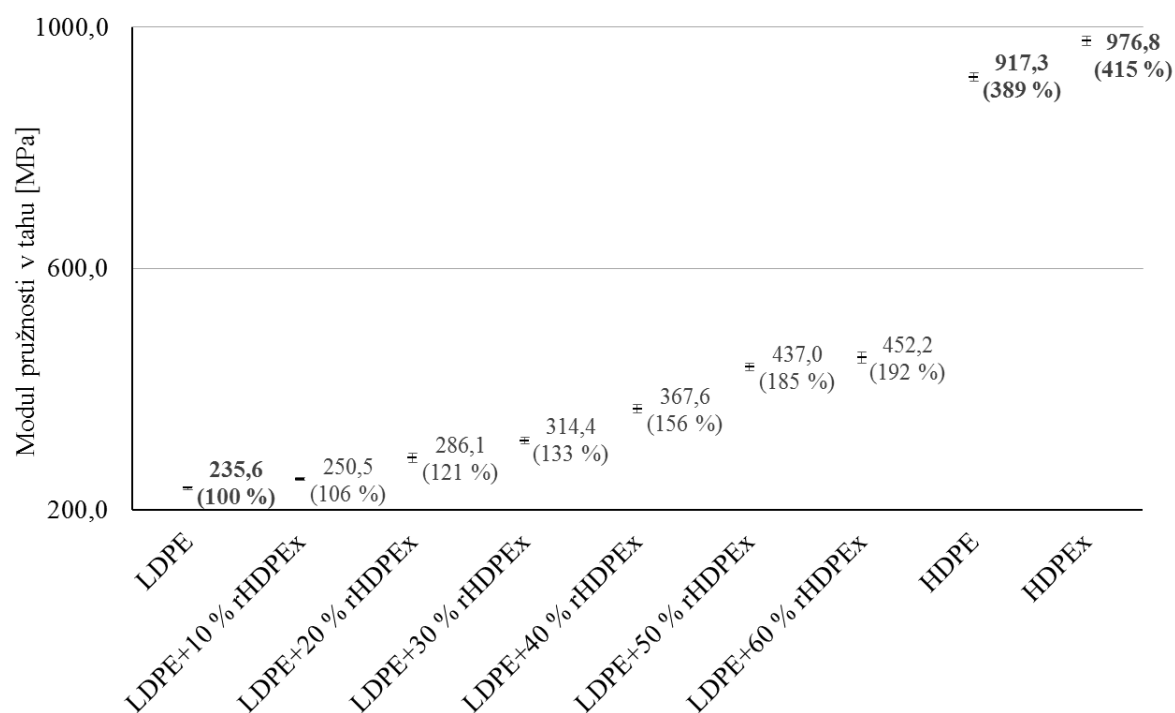
#### 4.1.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti patří mezi nejdůležitější vlastnosti pro popis chování jednotlivých materiálů, proto je jim v této práci věnována největší pozornost.

#### *Modul pružnosti v tahu E za pokojové teploty*

Tab. 4.1: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	235,6	250,5	286,1	314,4	367,6	437,0	452,2	917,3	976,8
Medián [MPa]	234,2	249,7	294,3	309,2	361,1	434,7	444,3	918,0	979,2
Směrodatná odchylka [MPa]	6,8	7,4	24,1	15,9	21,8	19,8	30,2	32,8	34,1
Nejistota typu A [MPa]	2,2	2,4	7,6	5,0	6,9	6,3	9,6	7,3	7,6
Minimum [MPa]	227,1	240,1	242,8	292,1	345,3	410,1	403,3	848,5	901,3
Maximum [MPa]	251,6	260,8	308,6	336,5	415,9	462,2	491,0	985,5	1021,7



Obr. 4.1: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty

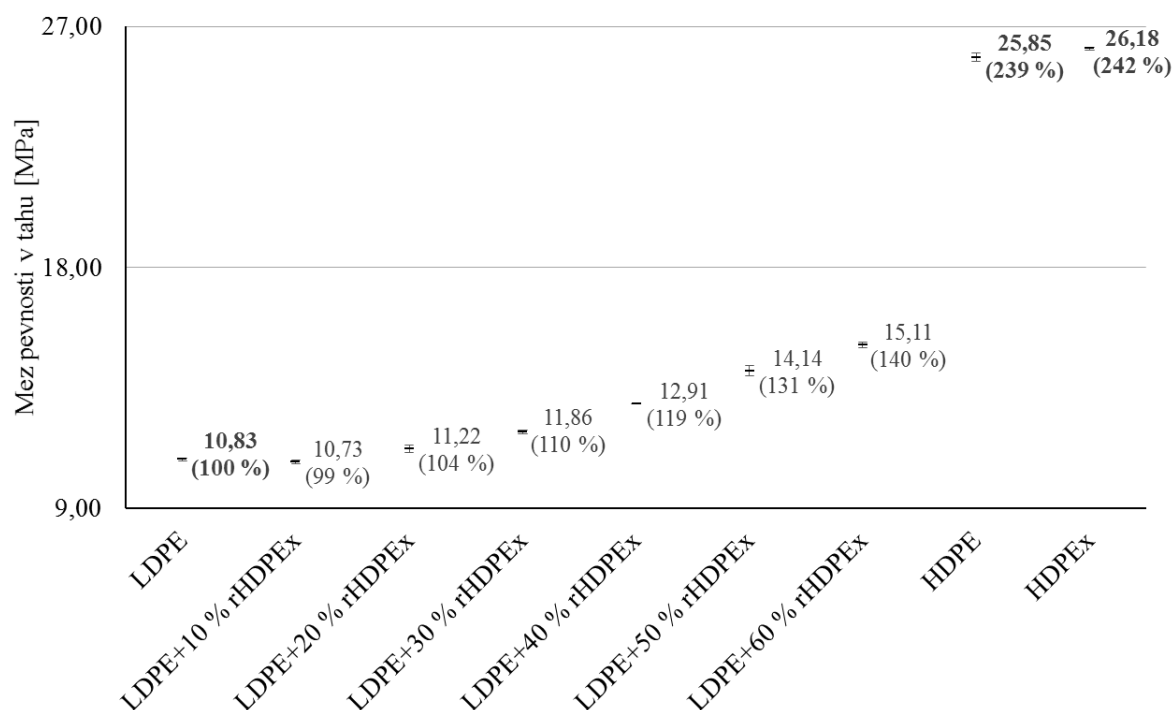
Z Obr. 4.1 je patrné, že již při nejnižší dávce plniva dochází ke zvýšení modulu pružnosti o 6 % z původní hodnoty 235,6 MPa na 250,5 MPa. Toto zvýšení dále

s rostoucí dávkou plnění pokračuje až na hodnotu 452,2 MPa u nejvyšší koncentrace plnění, což při porovnání s původním nemodifikovaným LDPE představuje nárůst o 92 %. Z Obr. 4.1 je taktéž vidět, že u zkoumané směsi nebylo dosaženo hodnot modulu pružnosti HDPE ani HDPE<sub>x</sub>. I přes tento fakt lze konstatovat pozitivní vliv použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva na modul pružnosti za pokojové teploty u všech koncentrací zkoumané směsi.

### Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za pokojové teploty

Tab. 4.2: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	10,83	10,73	11,22	11,86	12,91	14,14	15,11	25,85	26,18
Medián [MPa]	10,84	10,74	11,38	11,92	12,96	14,27	15,23	25,80	26,26
Směrodatná odchylka [MPa]	0,14	0,24	0,43	0,20	0,26	0,60	0,34	0,67	0,25
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,08	0,14	0,06	0,01	0,19	0,11	0,15	0,06
Minimum [MPa]	10,61	10,34	10,34	11,36	12,40	13,11	14,26	24,71	25,65
Maximum [MPa]	11,06	11,03	11,65	12,03	13,25	14,98	15,43	27,16	26,62



Obr. 4.2: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty

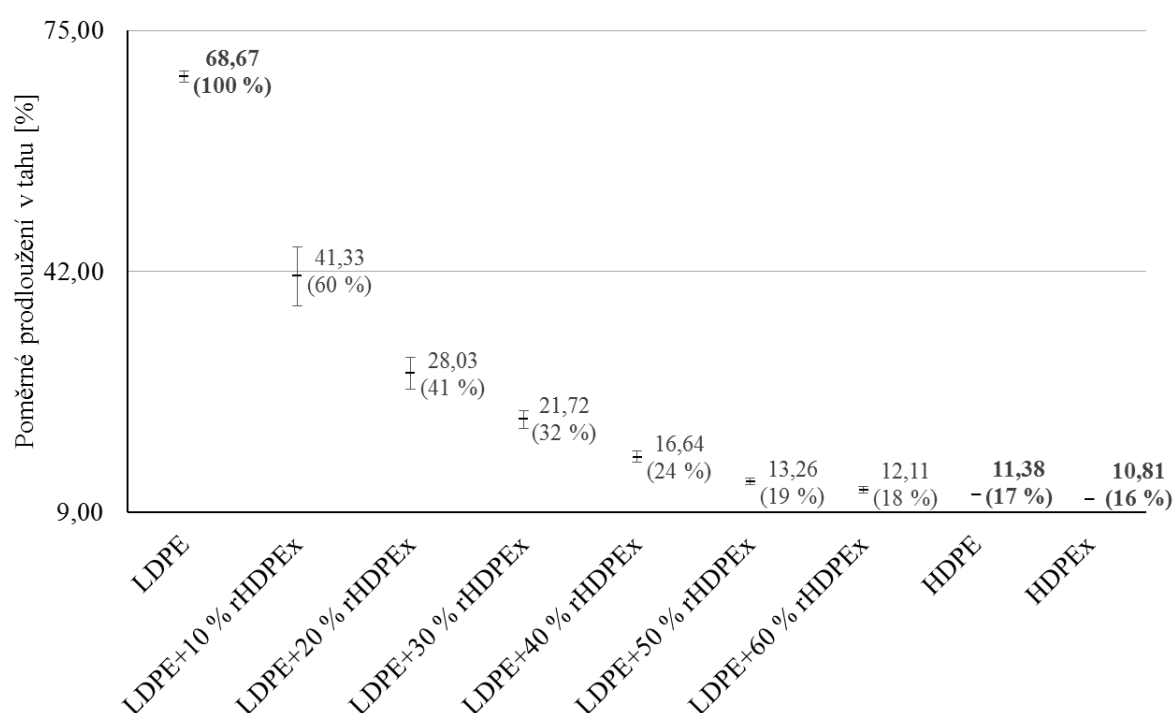
Na Obr. 4.2 je znázorněn vliv použitého plniva na mez pevnosti v tahu za pokojové teploty. Z výsledků lze vypořadovat velmi malý vliv u koncentrací s nízkým obsahem plniva, u nichž je změna pouze v řádu jednotek procent. U koncentrací s vyšším obsahem plniva (od 30 %) je jeho vliv výraznější. Celkově došlo k nárůstu meze pevnosti v tahu za pokojové teploty z 10,83 MPa u původního nemodifikovaného LDPE na 15,11 MPa u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>. Tento nárůst představuje změnu 40 %. Stejně jako v případě modulu pružnosti v tahu nebylo

u žádné z koncentrací zkoumané směsi dosaženo hodnot meze pevnosti HDPE ani HDPE<sub>x</sub>.

### *Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za pokojové teploty*

Tab. 4.3: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	68,67	41,33	28,03	21,72	16,64	13,26	12,11	11,38	10,81
Medián [%]	68,18	42,11	28,37	21,31	16,42	13,29	12,41	11,35	10,84
Směrodatná odchylka [%]	2,55	12,91	6,77	3,96	2,57	1,46	1,42	0,24	0,22
Nejistota typu A [%]	0,81	4,08	2,14	1,25	0,81	0,46	0,45	0,05	0,05
Minimum [%]	63,60	26,12	17,67	16,51	11,28	10,69	9,51	11,04	10,34
Maximum [%]	72,20	55,35	39,09	28,25	20,14	15,54	14,04	12,02	11,14



Obr. 4.3: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty

Zvyšující se pevnost a modul pružnosti v tahu s sebou přináší i negativa a to v podobě snižujícího se poměrného prodloužení v tahu (Obr. 4.3). Již u nejnižší koncentrace plnění došlo k jeho poklesu o 40 % oproti původnímu nemoďifikovanému LDPE. Dalším zvyšováním dávek použitého plniva kleslo poměrné prodloužení v tahu až na 18 % své původní hodnoty. Z dosažených výsledků lze konstatovat, že čím je vyšší hodnota modulu pružnosti resp. mez pevnosti v tahu, tím je nižší výsledné poměrné prodloužení v tahu.

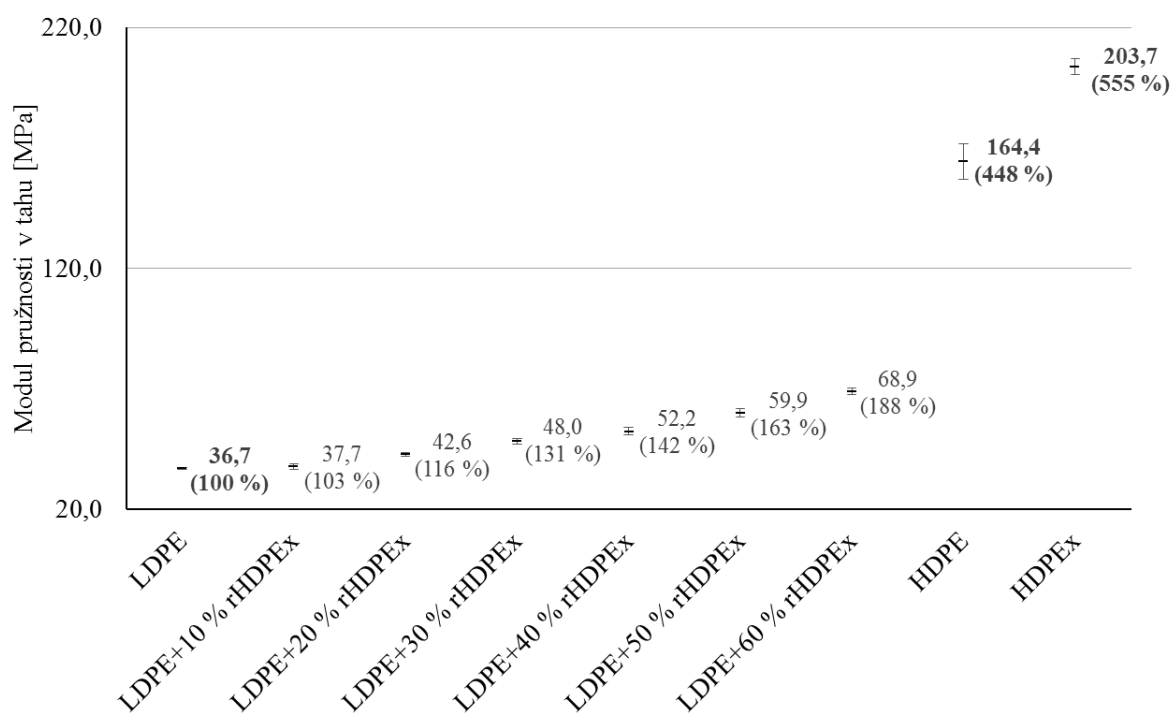
### *Modul pružnosti v tahu $E$ za zvýšené teploty*

Zkouška tahem za zvýšené teploty probíhala při teplotě 80 °C. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na původní oblast použití dodaných HDPE<sub>x</sub> trubek, které

sloužili jako podlahové vytápění s rozvodem teplé vody o maximální teplotě právě 80 °C.

Tab. 4.4: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	36,7	37,7	42,6	48,0	52,2	59,9	68,9	164,4	203,7
Medián [MPa]	36,0	37,8	42,6	47,5	51,3	60,3	68,8	164,5	203,7
Směrodatná odchylka [MPa]	1,4	3,7	2,0	3,7	4,7	5,3	4,1	20,9	11,5
Nejistota typu A [MPa]	0,5	1,2	0,6	1,2	1,5	1,7	1,3	7,4	3,3
Minimum [MPa]	35,3	29,2	39,2	41,8	45,4	50,9	64,5	137,4	184,7
Maximum [MPa]	39,2	42,0	45,5	55,3	61,1	67,4	78,5	192,5	221,8



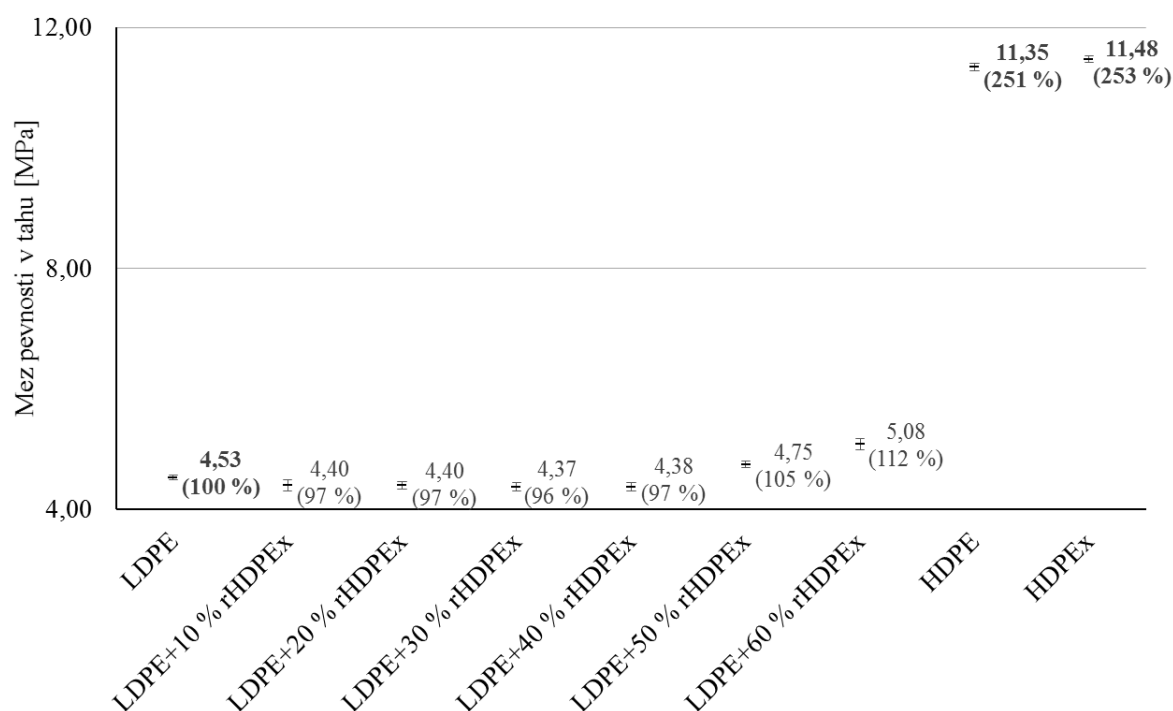
Obr. 4.4: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty

Porovnáním výsledků modulu pružnosti za zvýšené teploty je patrný jeho nárůst s rostoucí dávkou plniva (Obr. 4.4). Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla naměřena u maximální koncentrace plnění. Rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE a LDPE s 60 % plniva rHDPE<sub>x</sub> je 88 %, což v absolutních hodnotách odpovídá zvýšení z 36,7 MPa na 68,9 MPa. Velikosti modulu pružnosti v tahu HDPE i HDPE<sub>x</sub> nebylo u žádné z koncentrací dosaženo.

*Mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  za zvýšené teploty*

Tab. 4.5: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	4,53	4,40	4,40	4,37	4,38	4,75	5,08	11,35	11,48
Medián [MPa]	4,53	4,43	4,37	4,47	4,44	4,75	5,21	11,41	11,52
Směrodatná odchylka [MPa]	0,14	0,31	0,19	0,23	0,22	0,16	0,28	0,23	0,19
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,10	0,06	0,07	0,07	0,05	0,09	0,06	0,05
Minimum [MPa]	4,35	3,86	4,07	3,91	3,87	4,37	4,55	11,00	10,96
Maximum [MPa]	4,80	4,81	4,66	4,57	4,60	4,95	5,40	11,71	11,68



Obr. 4.5: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty

Jak je vidět na Obr. 4.5, z porovnání meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty lze vypočítat velmi malý vliv plniva. Největší rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE a zkoumanou směsí byl 12 %. Tento rozdíl byl naměřen u nejvyšší koncentrace plnění. U ostatních koncentrací plnění se rozdíl pohyboval pouze v jednotkách procent, u koncentrací 10 – 40 % došlo dokonce k mírnému poklesu této veličiny. Hodnoty meze pevnosti v tahu HDPE i HDPE<sub>x</sub> nebyly u žádné z koncentrací dosaženy.

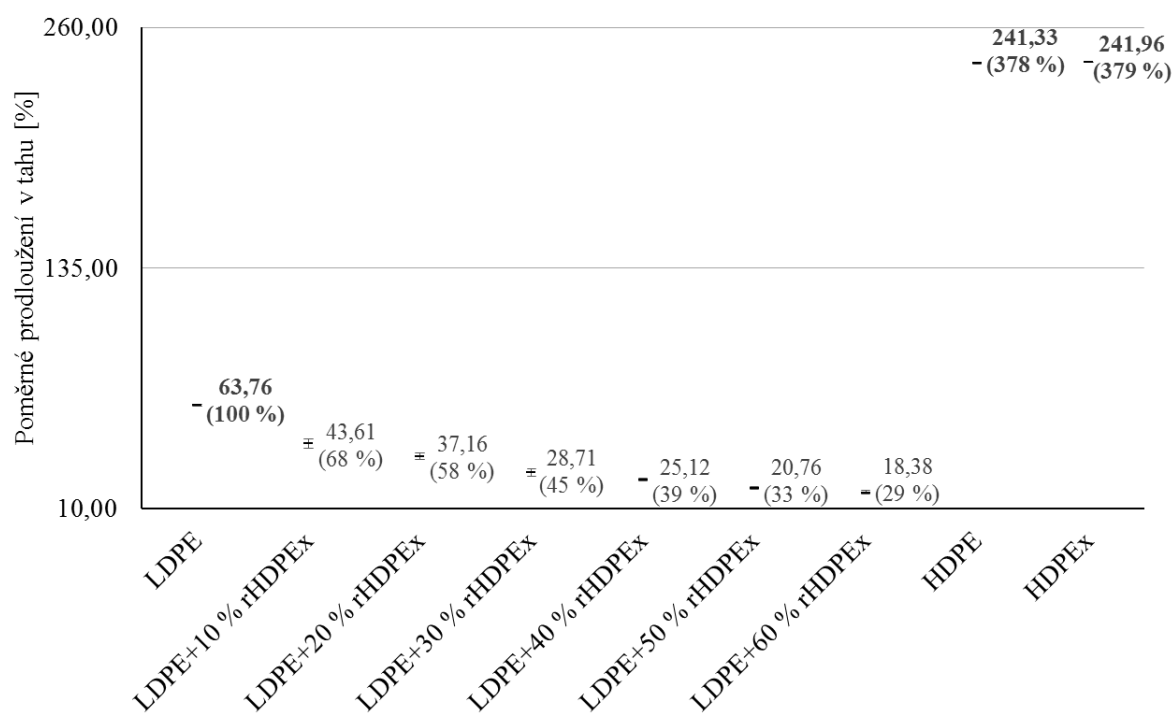


***Poměrné prodloužení v tahu  $\varepsilon_M$  za zvýšené teploty***

Tab. 4.6: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	63,76	43,61	37,16	28,71	25,12	20,76	18,38	241,33	241,96
Medián [%]	63,66	45,08	38,79	28,88	25,42	20,75	19,42	241,72	242,00
Směrodatná odchylka [%]	1,90	7,77	5,08	6,47	2,27	2,43	3,02	0,72	0,08
Nejistota typu A [%]	0,60	2,46	1,61	2,05	0,72	0,77	0,95	0,20	0,02
Minimum [%]	60,81	27,86	26,56	17,91	20,26	16,27	12,94	240,39	241,84
Maximum [%]	66,82	52,66	42,69	36,51	27,54	25,74	22,42	242,05	242,06

Z Obr. 4.6 je patrné, že poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty klesá s rostoucí dávkou plnění. Již u nejnižší koncentrace plniva došlo k poklesu této hodnoty o 32 % vzhledem k původnímu nemodifikovanému LDPE. Zvyšováním množství plniva došlo k dalšímu pozvolnému snižování. Největší pokles poměrného prodloužení byl naměřen u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, u něhož byl naměřen celkový rozdíl 71 %. Poměrné prodloužení v tahu kleslo z původních 63,76 % na 18,38 %.



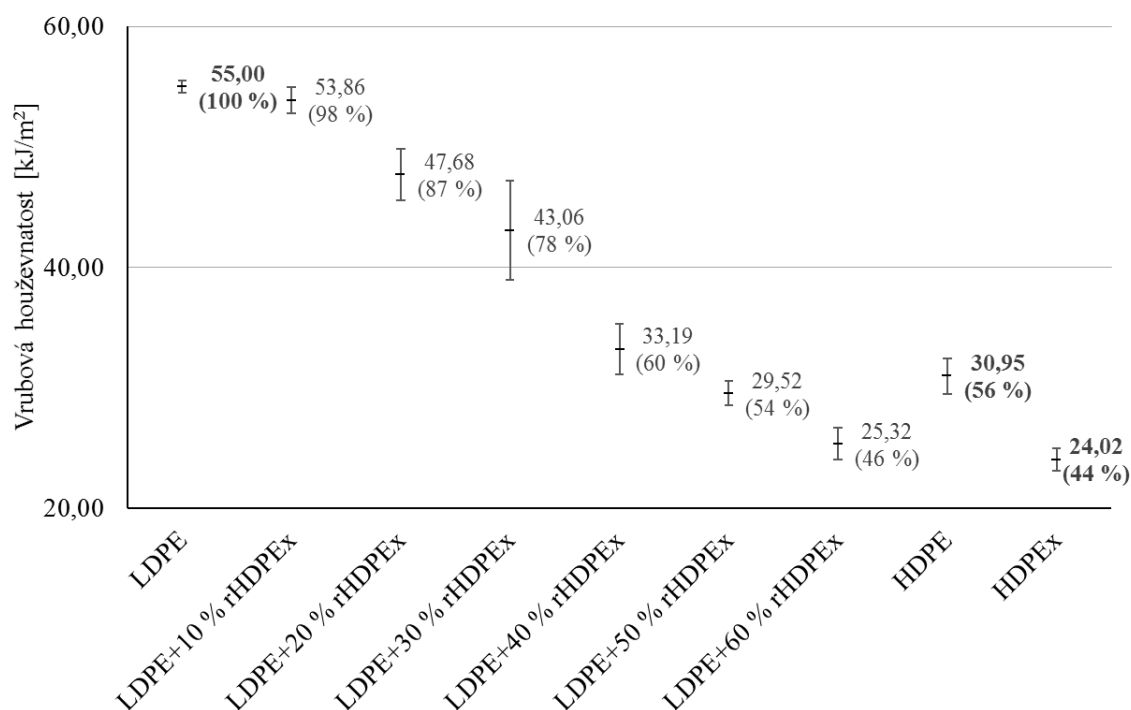
Obr. 4.6: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty

**Maximální vrubová houževnatost  $A_M$** 

Tab. 4.7: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	55,00	53,86	47,68	43,06	33,19	29,52	25,32	30,95	24,02
Medián [kJ/m <sup>2</sup> ]	55,12	52,92	50,23	44,38	31,20	29,49	25,57	31,96	23,96
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,17	2,38	4,72	9,24	4,68	2,29	2,97	3,34	2,04
Nejistota typu A [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,52	1,07	2,11	4,13	2,09	1,02	1,33	1,49	0,91
Minimum [kJ/m <sup>2</sup> ]	53,30	51,97	40,20	31,48	27,83	26,68	21,92	27,49	20,88
Maximum [kJ/m <sup>2</sup> ]	56,38	57,97	51,23	52,58	39,24	32,99	28,43	35,02	26,00

Porovnáním vrubové houževnatosti původního neplněného LDPE a LDPE s podílem rHDPE<sub>x</sub>, lze konstatovat, že s rostoucí dávkou plnění tato veličina klesá (Obr. 4.7). U nejnižší koncentrace plniva je rozdíl mezi původním LDPE pouze 2 %. Nicméně při dalším zvyšování podílu plniva dochází k poklesu vrubové houževnatosti z původní hodnoty 55 kJ/m<sup>2</sup> až na 25,32 kJ/m<sup>2</sup> u nejvyšší koncentrace plnění. Celkový rozdíl odpovídá poklesu o 64 %. Vrubová houževnatost HDPE a HDPE<sub>x</sub> je srovnatelná s vrubovou houževnatostí LDPE s 50 resp. 60% koncentrací plnění.



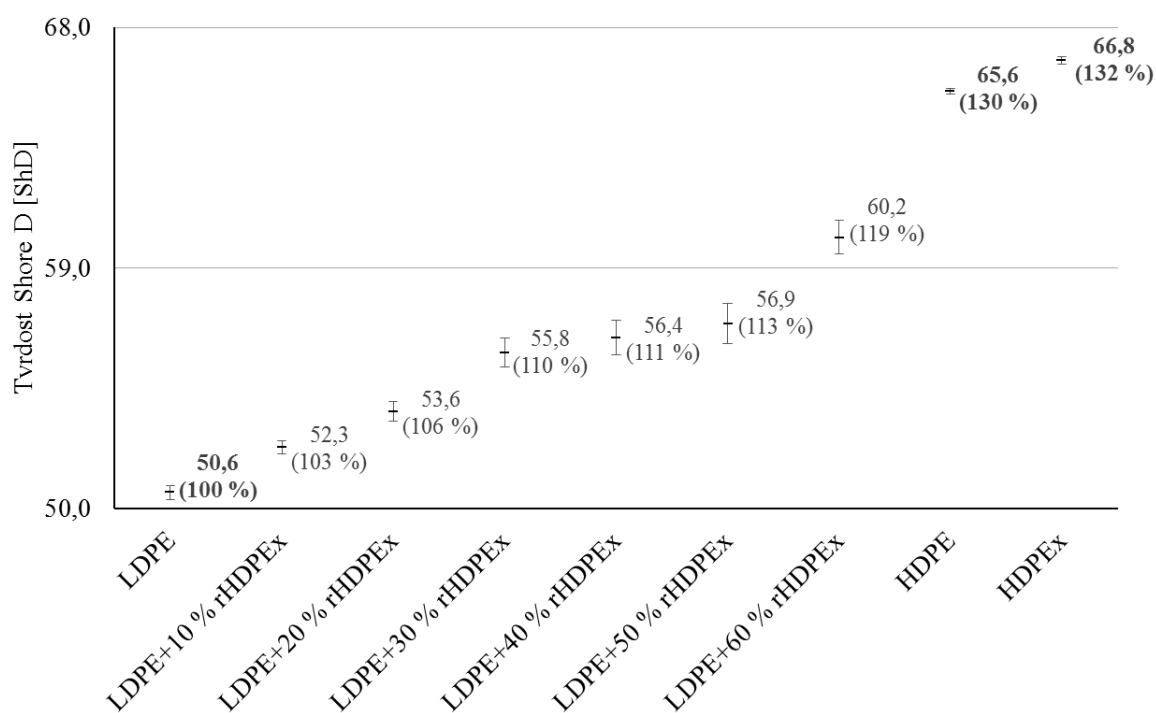
Obr. 4.7: Maximální vrubová houževnatost

**Tvrdość Shore D**

Tab. 4.8: Naměřená data tvrdosti Shore D

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [ShD]	50,6	52,3	53,6	55,8	56,4	56,9	60,2	65,6	66,8
Medián [ShD]	50,8	52,0	53,4	55,2	56,0	56,5	60,7	65,7	66,8
Směrodatná odchylka [ShD]	0,9	0,7	1,2	1,7	2,1	2,4	2,0	0,4	0,4
Nejistota typu A [ShD]	0,3	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,6	0,1	0,1
Minimum [ShD]	48,4	51,6	52,3	53,6	54,1	54,0	57,0	64,9	66,2
Maximum [ShD]	51,3	53,6	55,7	58,8	59,8	61,5	63,1	66,1	67,5

Z výsledků měření tvrdosti zkoumané směsi je patrné, že s rostoucí dávkou plniva roste i výsledná tvrdost. Při porovnání původního nemodifikovaného LDPE a LDPE s maximální koncentrací rHDPE<sub>x</sub> můžeme pozorovat téměř 20% nárůst této veličiny (Obr. 4.8). Tvrdość Shore D celkově vzrostla z 50,6 ShD na 60,2 ShD u nejvyšší koncentrace plnění. Porovnáním jednotlivých koncentrací zkoumané směsi lze konstatovat, že u maximální koncentrace bylo dosaženo zhruba 90% tvrdosti HDPE, resp. HDPE<sub>x</sub>.



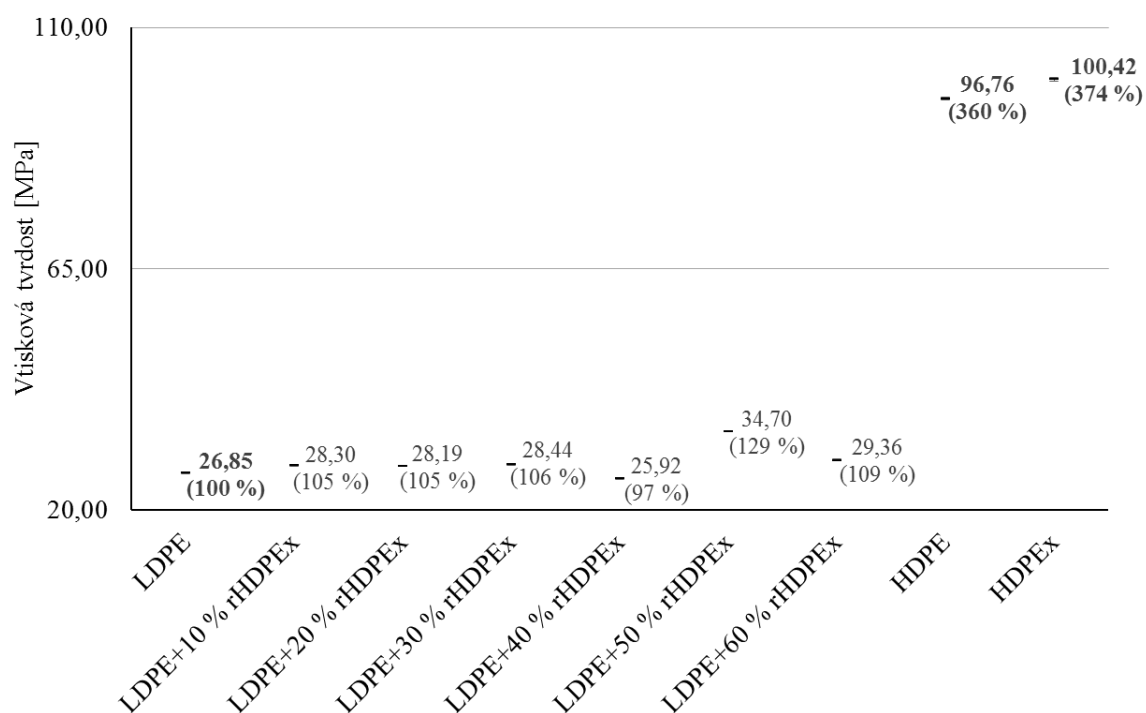
Obr. 4.8: Tvrdość Shore D

**Mikrotvrdost**

Tab. 4.9: Naměřená data vtiskové tvrdosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	26,85	28,30	28,19	28,44	25,92	34,70	29,36	96,76	100,42
Medián [MPa]	26,85	28,24	28,16	28,38	25,99	34,68	29,37	96,68	100,41
Směrodatná odchylka [MPa]	0,13	0,21	0,11	0,18	0,61	0,08	0,39	0,91	1,15
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,07	0,04	0,06	0,19	0,03	0,12	0,29	0,37
Minimum [MPa]	26,62	28,08	28,06	28,23	24,83	34,61	28,89	95,45	98,72
Maximum [MPa]	27,07	28,66	28,38	28,76	26,85	34,81	30,04	98,24	102,32

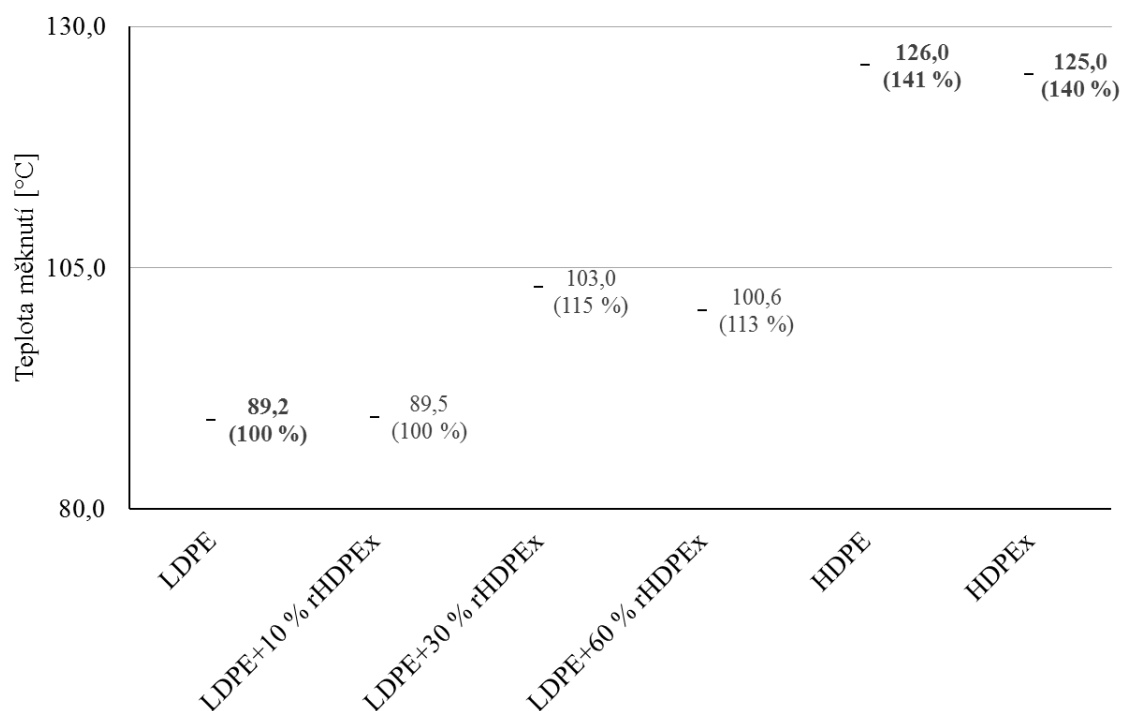
Zkouška mikrotvrdosti slouží k porovnání tvrdosti pouze povrchové vrstvy, tj. ve hloubce několika mikrometrů. Z výsledků vyplývá (Obr. 4.9), že až do koncentrace 40 % je vliv plniva na mikrotvrdost reprezentovanou vtiskovou tvrdostí HIT velmi malý. Rozdíly mezi původním nemodifikovaným LDPE se pohybují pouze v rámci jednotek procent. Nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u směsi s koncentrací plniva 50 %, kde rozdíl mezi původním materiálem činí téměř 30 %. U nejvyšší koncentrace klesla hodnota vtiskové tvrdosti na 29,36 MPa, jedná se tak pouze o 9% nárůst oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Hodnot vtiskové tvrdosti HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo.



Obr. 4.9: Vtisková tvrdost

## 4.1.2 Tepelné vlastnosti

### *Teploty měknutí dle Vicata*



Obr. 4.10: Teplota měknutí

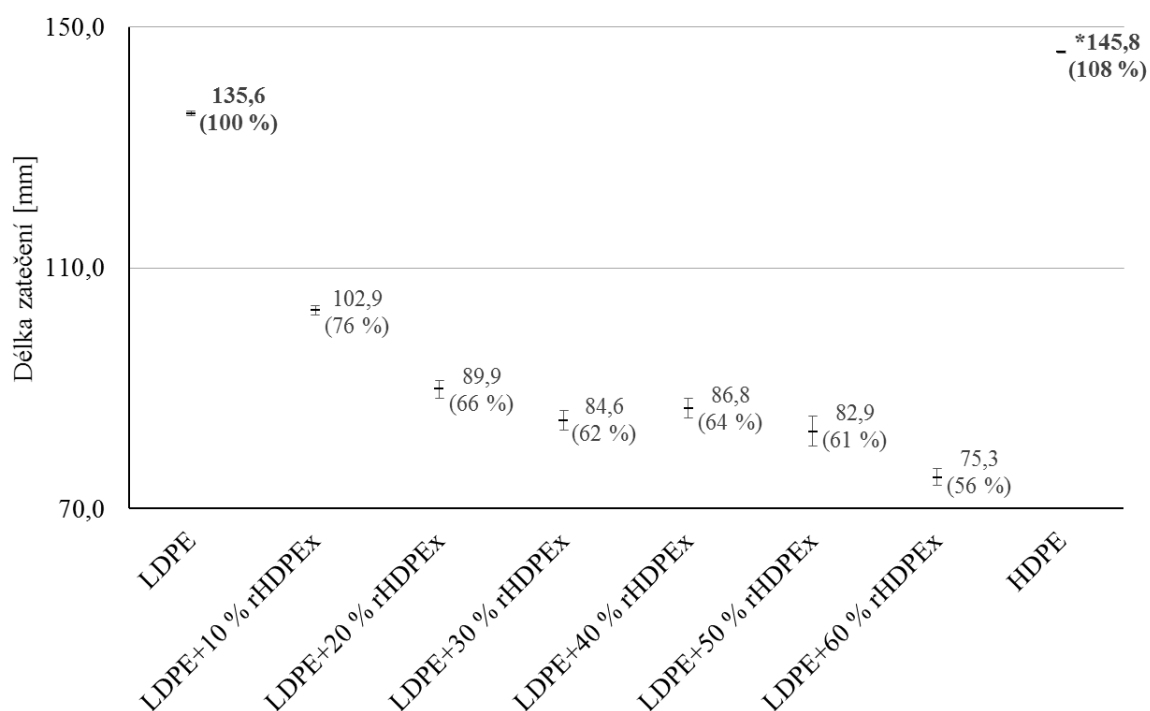
Vliv použitého plniva na teplotu měknutí dle Vicata je znázorněn na Obr. 4.10. Z výsledků lze vypožorovat, že u koncentrace 10 % je vliv plniva zanedbatelný, ale u koncentrací 30 a 60 % došlo ke vzrůstu. Nejvyšší nárůst teploty měknutí byl zaznamenán u koncentrace 30 %, kde je rozdíl oproti původnímu nemodifikovanému LDPE 15 %. Teplota měknutí u této koncentrace vzrostla z 89,2 °C na 103 °C. Vicatova teplota měknutí HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebyla dosažena.

## 4.1.3 Zpracovatelské vlastnosti

### *Délka zatečení ve spirále*

Tab. 4.10: Naměřená data délky zatečení ve spirále

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE
Aritmetický průměr [mm]	135,6	102,9	89,9	84,6	86,8	82,9	75,3	145,8
Medián [mm]	136,0	102,5	91,0	82,5	87,0	84,5	73,5	146,0
Směrodatná odchylka [mm]	1,1	2,2	4,2	4,6	4,6	7,1	4,0	0,4
Nejistota typu A [mm]	0,4	0,8	1,5	1,6	1,6	2,5	1,4	0,1
Minimum [mm]	134,0	100,0	83,0	81,0	79,0	70,0	71,0	145,0
Maximum [mm]	137,0	107,0	94,0	94,0	92,0	94,0	82,0	146,0



Obr. 4.11: Délka zatečení ve spirále

Porovnáním výsledků zatékavosti jednotlivých směsí lze pozorovat sestupnou tendenci s rostoucí dávkou plnění (Obr. 4.11). Již u koncentrace 10 % došlo k výraznému poklesu o 24 % vzhledem k původnímu nemodifikovanému LDPE. Dalším zvyšováním podílu plniva klesla hodnota zatékavosti až na téměř polovinu své původní hodnoty. Celkový rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE a LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub> je 44 %, což odpovídá poklesu z 135,6 mm na 75,3 mm. Pro porovnání je uvedena i hodnota původního nemodifikovaného HDPE, která byla ale měřena za jiných vstřikovacích podmínek (viz. Tab 3.3).

## 4.2 Směs B - granulát LDPE + prášek rHDPE<sub>x</sub>

### 4.2.1 Mechanické vlastnosti

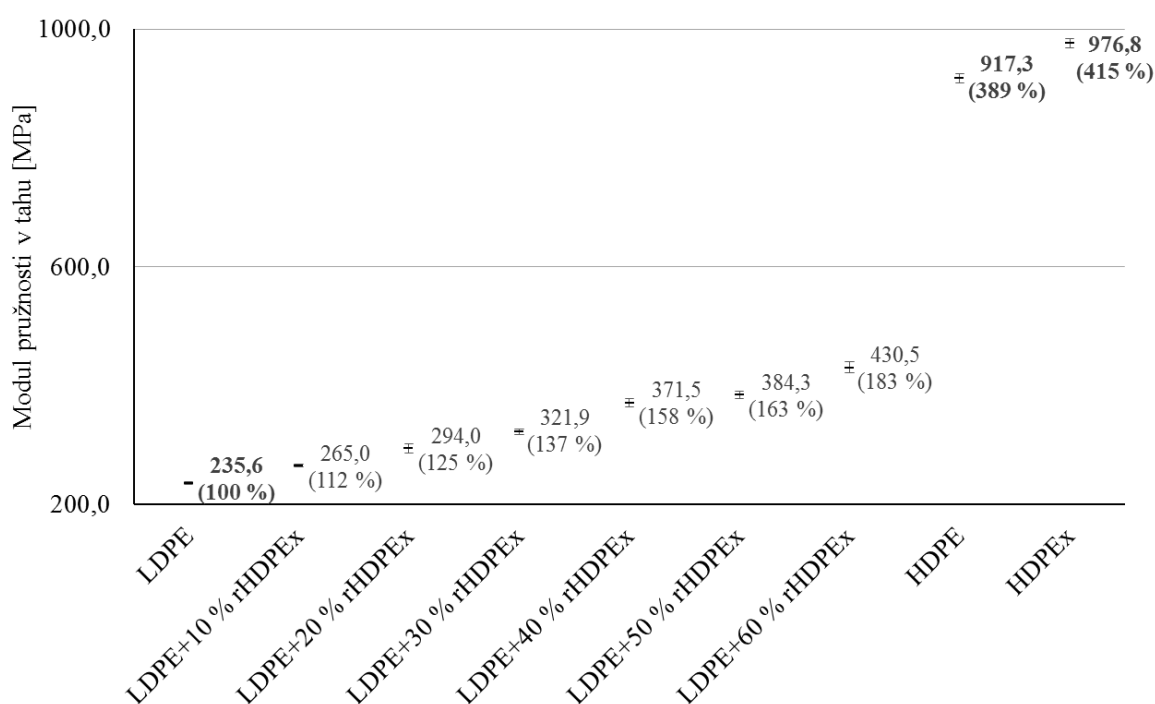
#### Modul pružnosti v tahu $E$ za pokojové teploty

Tab. 4.11: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	235,6	265,0	294,0	321,9	371,5	384,3	430,5	917,3	976,8
Medián [MPa]	234,2	267,8	291,9	324,3	374,1	385,9	426,4	918,0	979,2
Směrodatná odchylka [MPa]	6,8	2,9	3,3	2,7	2,4	3,6	3,3	32,8	34,1
Nejistota typu A [MPa]	2,2	2,4	7,6	5,0	6,9	6,3	9,6	7,3	7,6
Minimum [MPa]	227,1	245,9	281,0	307,1	355,2	366,3	420,5	848,5	901,3
Maximum [MPa]	251,6	277,7	315,4	332,6	378,7	402,1	446,8	985,5	1021,7

Na Obr. 4.12 je znázorněno porovnání modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty. Z naměřených výsledků lze vypočítat pozitivní vliv použitého rHDPE<sub>x</sub>

plniva. Modul pružnosti vzrostl celkově z 236,6 MPa na 430,5 MPa při porovnání původního nemodifikovaného LDPE a LDPE s největším podílem plniva. Tento vzrůst odpovídá změně o 83 %. Hodnot modulu pružnosti v tahu HDPE i HDPE<sub>x</sub> nebylo ani u nejvyšší koncentrace plniva dosaženo.



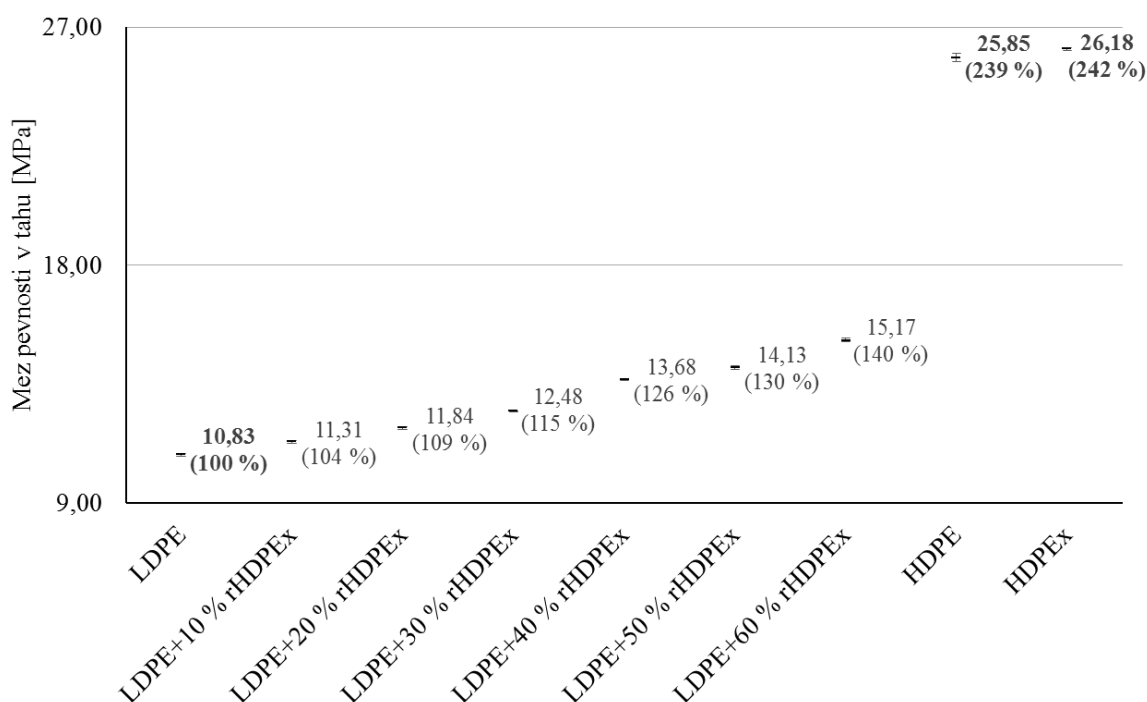
Obr. 4.12: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty

### Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za pokojové teploty

Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty pozvolně rostla s rostoucí dávkou plnění jak je vidět na Obr. 4.13. U nejnižší koncentrace plniva je rozdíl pouze 4 %, ale s rostoucím podílem plniva došlo k nárůstu až na 40 % oproti původního nemodifikovaného LDPE. V absolutních hodnotách vzrostla mez pevnosti v tahu za pokojové teploty z 10,83 MPa na 15,17 MPa. Mez pevnosti v tahu HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebyla dosažena.

Tab. 4.12: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	10,83	11,31	11,84	12,48	13,68	14,13	15,17	25,85	26,18
Medián [MPa]	10,84	11,32	11,81	12,46	13,70	14,11	15,16	25,80	26,26
Směrodatná odchylka [MPa]	0,14	0,16	0,14	0,05	0,10	0,23	0,20	0,67	0,25
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,05	0,04	0,02	0,03	0,07	0,06	0,15	0,06
Minimum [MPa]	10,61	11,00	11,69	12,40	13,51	13,86	14,93	24,71	25,65
Maximum [MPa]	11,06	11,63	12,08	12,58	13,83	14,55	15,53	27,16	26,62



Obr. 4.13: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty

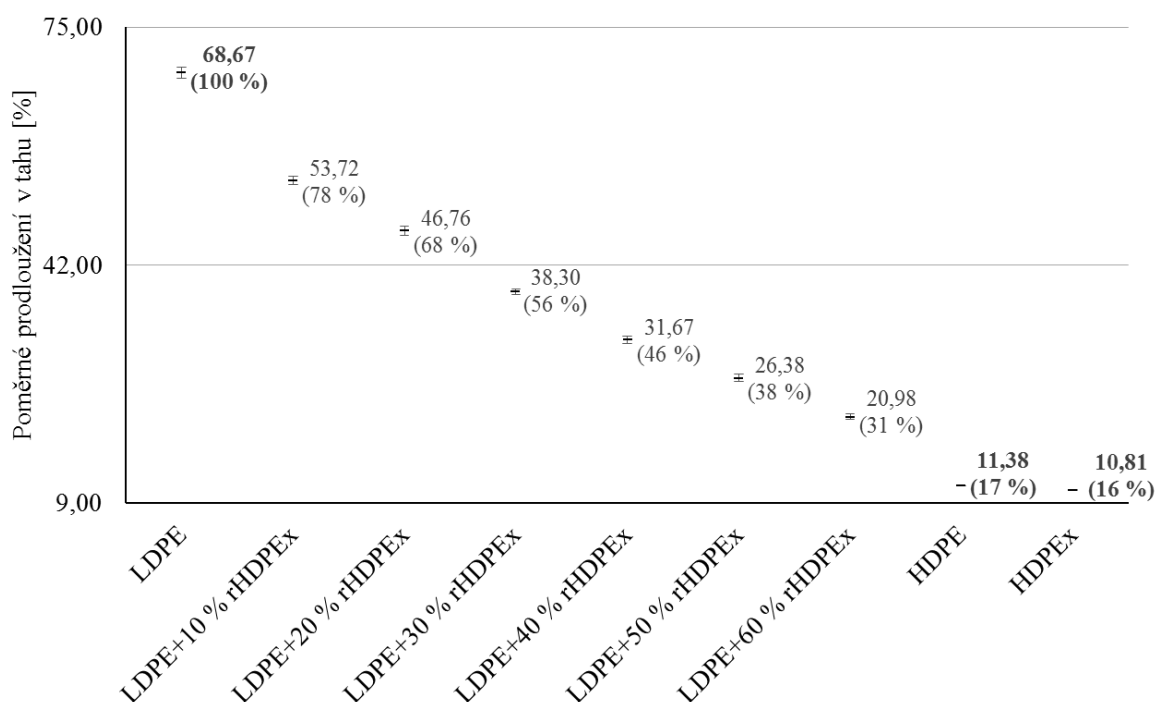
### Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za pokojové teploty

Tab. 4.13: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	68,67	53,72	46,76	38,30	31,67	26,38	20,98	11,38	10,81
Medián [%]	68,18	53,38	47,80	37,74	32,09	26,57	21,37	11,35	10,84
Směrodatná odchylka [%]	2,55	1,81	2,04	1,32	1,62	1,81	1,19	0,24	0,22
Nejistota typu A [%]	0,81	0,57	0,65	0,42	0,51	0,57	0,38	0,05	0,05
Minimum [%]	63,60	51,97	43,24	37,40	28,26	23,04	18,13	11,04	10,34
Maximum [%]	72,20	58,04	48,57	41,15	33,06	28,32	22,23	12,02	11,14

Při porovnání hodnot poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty lze pozorovat klesající tendenci (viz. Obr. 4.14). Již u nejnižší koncentrace plnění došlo ke skokovému poklesu o 22 % oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. U dalších koncentrací se poměrné prodloužení v tahu postupně snížilo až o téměř 70 %.





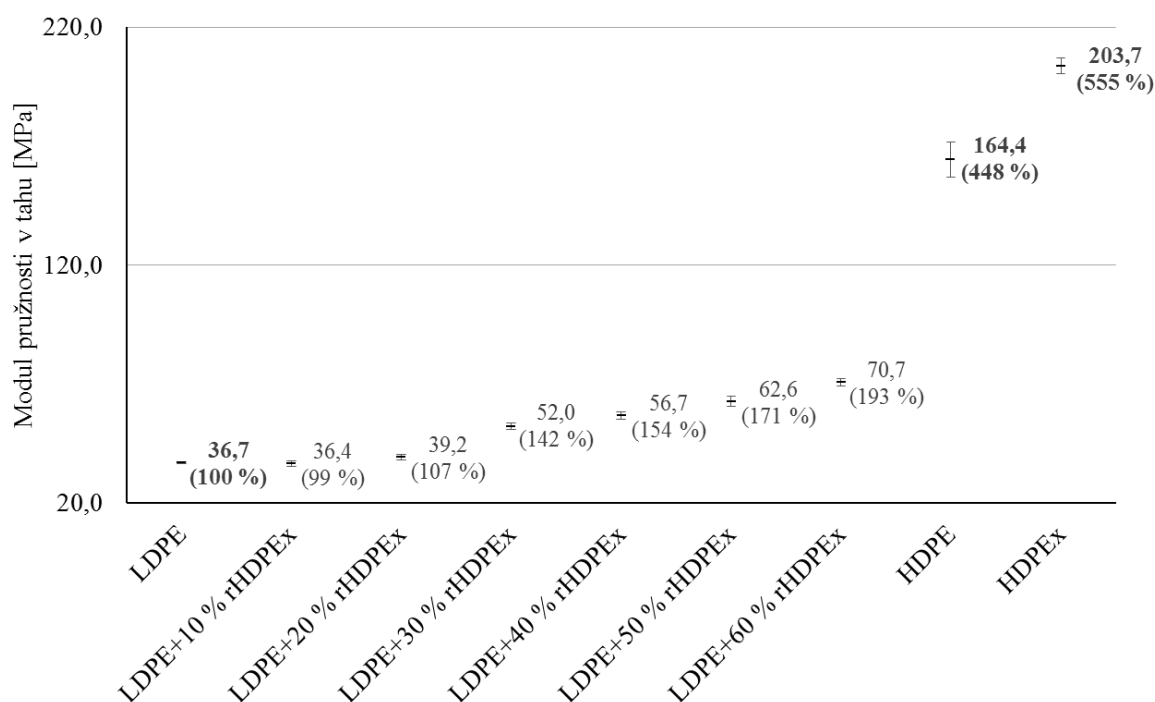
Obr. 4.14: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty

### Modul pružnosti v tahu $E$ za zvýšené teploty

Tab. 4.14: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	36,7	36,4	39,2	52,0	56,7	62,6	70,7	164,4	203,7
Medián [MPa]	36,0	36,8	39,6	51,2	57,1	60,8	69,5	164,5	203,7
Směrodatná odchylka [MPa]	1,4	3,9	3,9	4,2	5,2	7,1	4,8	20,9	11,5
Nejistota typu A [MPa]	0,5	1,2	1,2	1,3	1,6	2,3	1,5	7,4	3,3
Minimum [MPa]	35,3	27,3	33,1	46,3	48,4	53,4	64,3	137,4	184,7
Maximum [MPa]	39,2	42,0	44,1	59,1	63,8	74,9	77,3	192,5	221,8

Na Obr. 4.15 jsou znázorněny naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty. Z měření vyplývá, že u koncentrací 10 a 20 % je vliv plniva velmi malý a pohybuje se pouze v rámci jednotek procent. U koncentrace plniva 30 % došlo ke skokovému vzrůstu o 40 % oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Další zvyšování podílu plniva způsobilo nárůst modulu až o 93 %. Celkově vzrostla hodnota modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty z původních 36,7 MPa až na 70,7 MPa u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>.



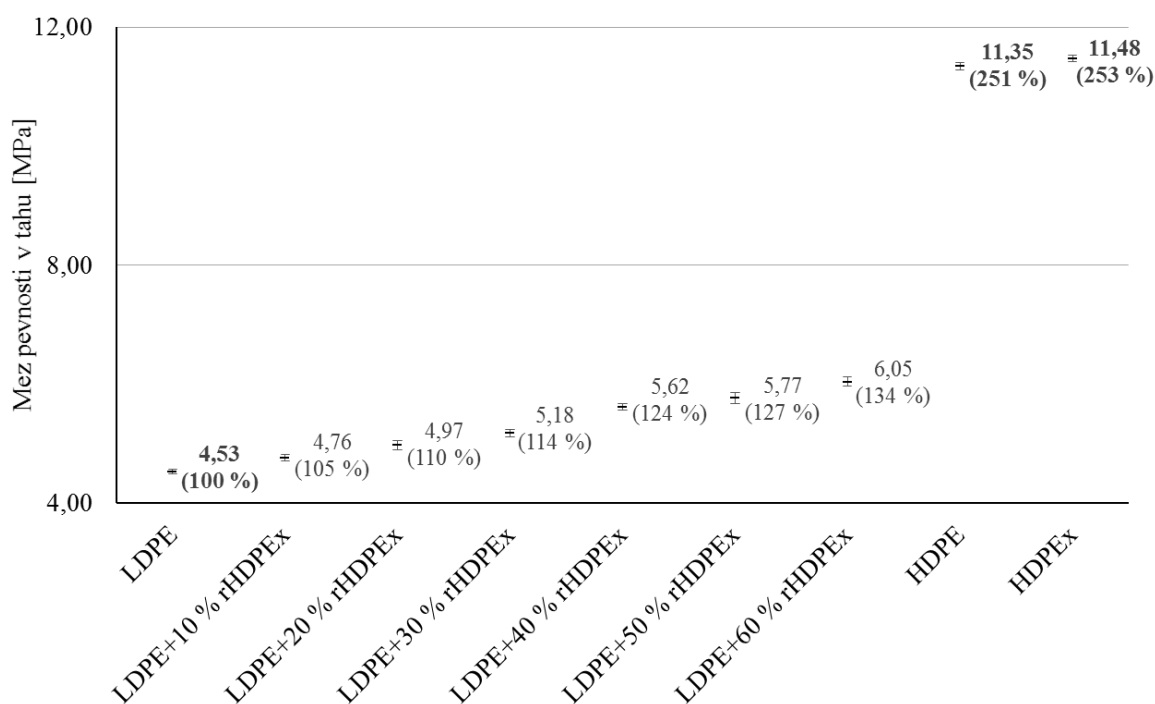
Obr. 4.15: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty

### Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za zvýšené teploty

Pozitivní vliv použitého plniva je možné pozorovat i u meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty (Obr. 4.16). Nejvyšší hodnota byla naměřena u maximální koncentrace plnění. Celkový rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE a LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub> činí 34 %, což odpovídá vzrůstu ze 4,53 MPa na 6,05 MPa. Meze pevnosti v tahu HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo.

Tab. 4.15: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	4,53	4,76	4,97	5,18	5,62	5,77	6,05	11,35	11,48
Medián [MPa]	4,53	4,83	5,03	5,20	5,66	5,83	6,00	11,41	11,52
Směrodatná odchylka [MPa]	0,14	0,17	0,24	0,18	0,18	0,30	0,23	0,23	0,19
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,05	0,08	0,06	0,06	0,10	0,07	0,06	0,05
Minimum [MPa]	4,35	4,45	4,42	4,93	5,25	5,29	5,74	11,00	10,96
Maximum [MPa]	4,80	4,94	5,23	5,41	5,83	6,26	6,51	11,71	11,68



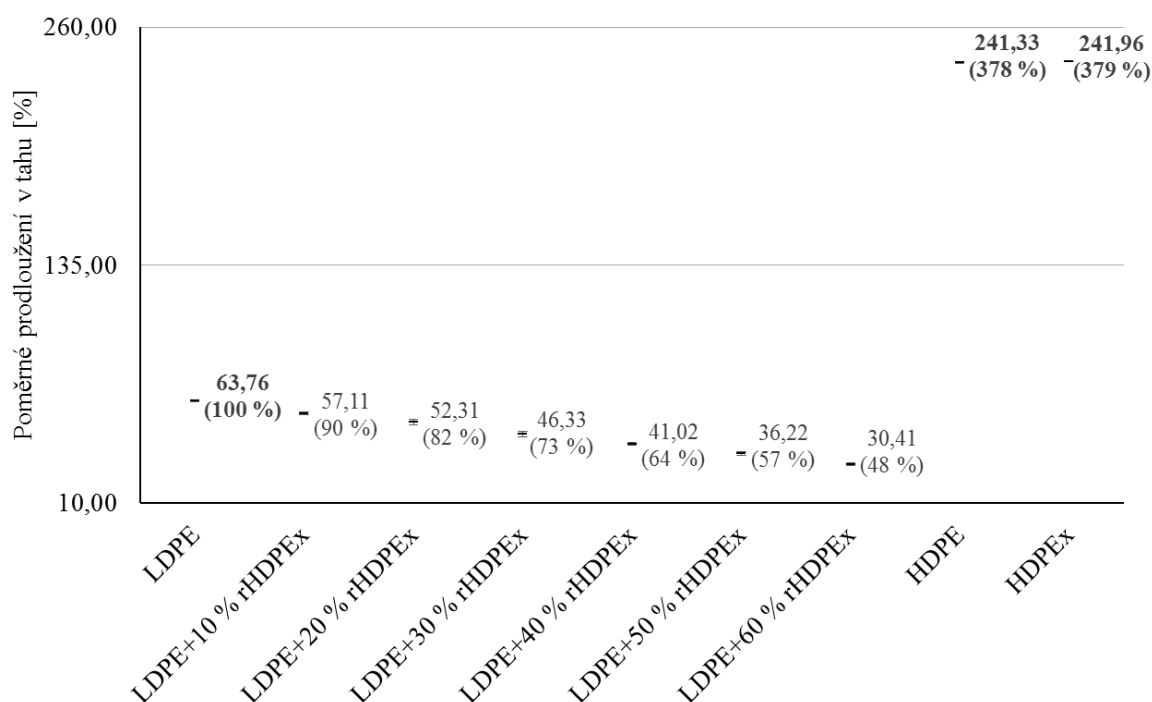
Obr. 4.16: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty

### Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za zvýšené teploty

Tab. 4.16: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	63,76	57,11	52,31	46,33	41,02	36,22	30,41	241,33	241,96
Medián [%]	63,66	57,56	52,74	46,10	41,08	36,20	32,12	241,72	242,00
Směrodatná odchylka [%]	1,90	1,74	4,58	4,60	2,28	3,18	2,67	0,72	0,08
Nejistota typu A [%]	0,60	0,55	1,45	1,45	0,72	1,01	0,85	0,20	0,02
Minimum [%]	60,81	54,01	40,14	36,87	37,52	32,12	26,09	240,39	241,84
Maximum [%]	66,82	59,64	57,27	52,99	44,84	42,67	32,82	242,05	242,06

Porovnáním poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty je vidět sestupná tendence. S rostoucí dávkou plnění došlo k pozvolnému snížení poměrného prodloužení v tahu z 63,76 % u původního nemodifikovaného LDPE na 30,41 % u LDPE s nejvyšší koncentrací plniva. Tento pokles odpovídá změně o 52 % jak je vidět na Obr. 4.17. Hodnota poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty u HDPE i HDPE<sub>x</sub> mnohonásobně převyšuje hodnoty zkoumané směsi.



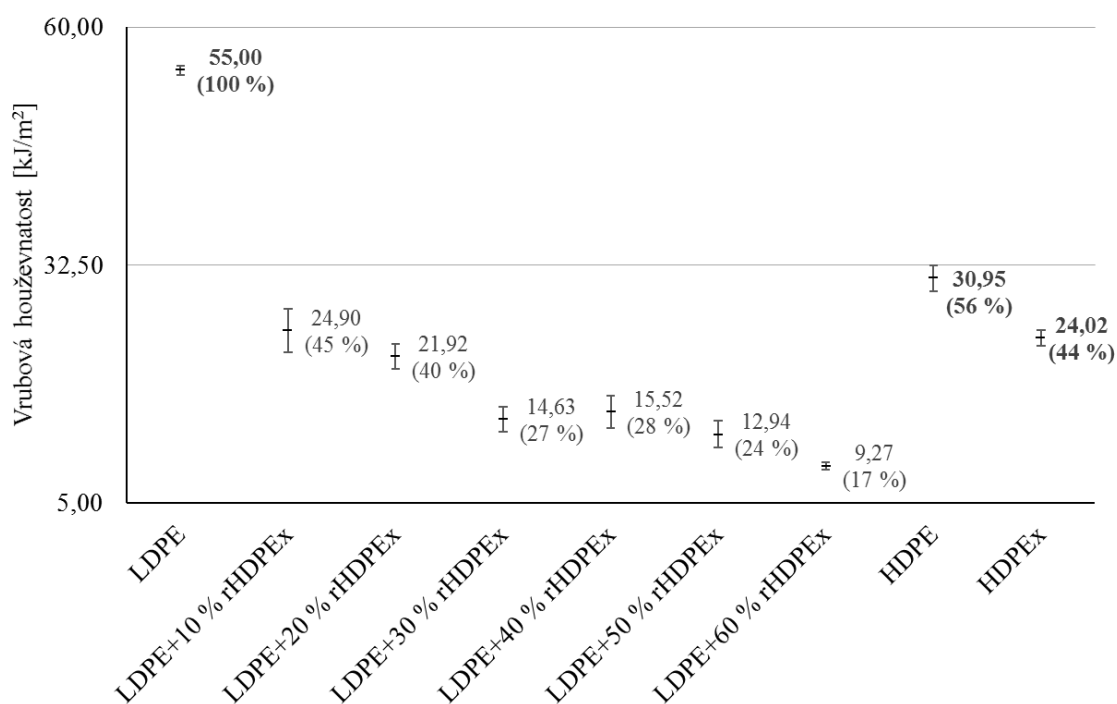
Obr. 4.17: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty

**Maximální vrubová houževnatost  $A_M$** 

Tab. 4.17: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	55,00	24,90	21,92	14,63	15,52	12,94	9,27	30,95	24,02
Medián [kJ/m <sup>2</sup> ]	55,12	25,67	21,83	15,14	16,17	13,86	9,07	31,96	23,96
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,17	5,57	3,17	3,19	4,19	3,49	0,90	3,34	2,04
Nejistota typu A [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,52	2,49	1,42	1,43	1,88	1,56	0,40	1,49	0,91
Minimum [kJ/m <sup>2</sup> ]	53,30	19,18	17,90	11,51	8,68	8,84	8,03	27,49	20,88
Maximum [kJ/m <sup>2</sup> ]	56,38	31,76	26,31	19,33	19,02	16,26	10,23	35,02	26,00

Na Obr. 4.18 jsou zobrazeny výsledky maximální vrubové houževnatosti. Z výsledků je vidět značný pokles již u nejnižší koncentrace plniva, kdy došlo ke skokovému snížení vrubové houževnatosti o 55 %. Dalším zvyšováním podílu plniva klesá vrubová houževnatost pozvolněji. Celkově došlo ke snížení z 55 kJ/m<sup>2</sup> na 9,27 kJ/m<sup>2</sup> při porovnání původního nemoifikovaného LDPE a LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>. Vrbová houževnatost HDPE a HDPE<sub>x</sub> přibližně odpovídá vrubové houževnatosti LDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub>.



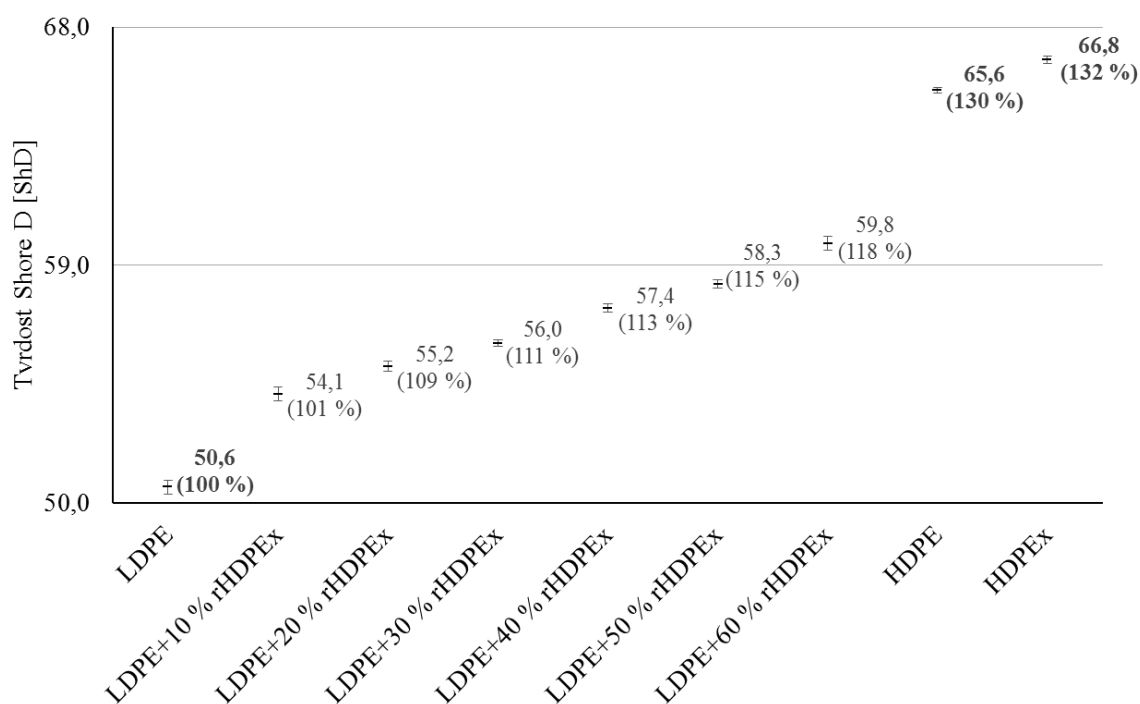
Obr. 4.18: Maximální vrubová houževnatost

**Tvrdość Shore D**

Tab. 4.18: Naměřená data tvrdosti Shore D

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [ShD]	50,6	54,1	55,2	56,0	57,4	58,3	59,8	65,6	66,8
Medián [ShD]	50,8	54,0	55,4	56,0	57,4	58,3	59,7	65,7	66,8
Směrodatná odchylka [ShD]	0,9	0,8	0,6	0,4	0,5	0,5	0,8	0,4	0,4
Nejistota typu A [ShD]	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1
Minimum [ShD]	48,4	53,3	54,3	55,4	56,7	57,6	58,7	64,9	66,2
Maximum [ShD]	51,3	56,1	55,9	56,6	58,0	59,1	61,2	66,1	67,5

Z výsledků měření Shore D tvrdosti lze vypočítat vzrůstající tendenci s rostoucím podílem plniva (Obr. 4.19). Již u nejnižší koncentrace došlo ke zvýšení tvrdosti o 7 % oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Nejvyšší hodnota Shore D tvrdosti byla naměřena u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž došlo k nárůstu z původních 50,6 ShD na 59,8 ShD. Hodnot tvrdosti HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo.



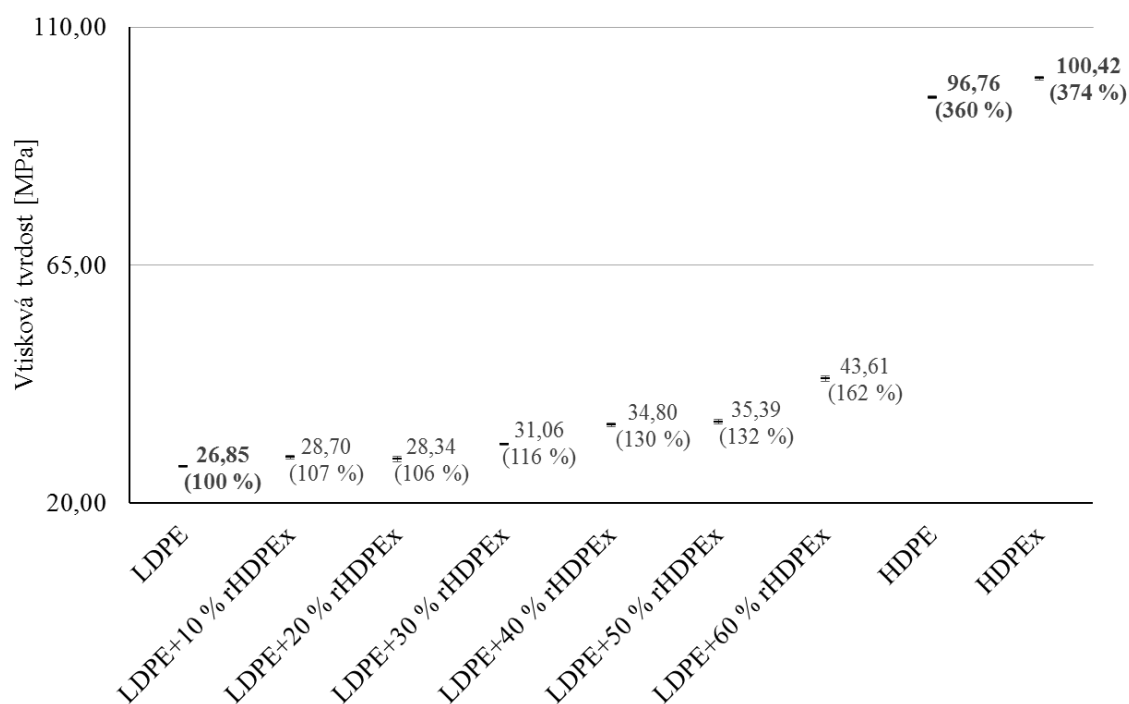
Obr. 4.19: Tvrdość Shore D

### Mikrotvrdość

Tab. 4.19: Naměřená data vtiskové tvrdosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	26,85	28,70	28,34	31,06	34,80	35,39	43,61	96,76	100,42
Medián [MPa]	26,85	28,60	28,40	31,22	34,43	35,71	43,61	96,68	100,41
Směrodatná odchylka [MPa]	0,13	0,98	1,80	0,54	1,03	1,40	1,68	0,91	1,15
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,31	0,57	0,17	0,32	0,44	0,53	0,29	0,37
Minimum [MPa]	26,62	27,71	24,89	30,09	33,68	32,52	41,02	95,45	98,72
Maximum [MPa]	27,07	30,78	30,82	31,74	36,51	37,05	46,58	98,24	102,32

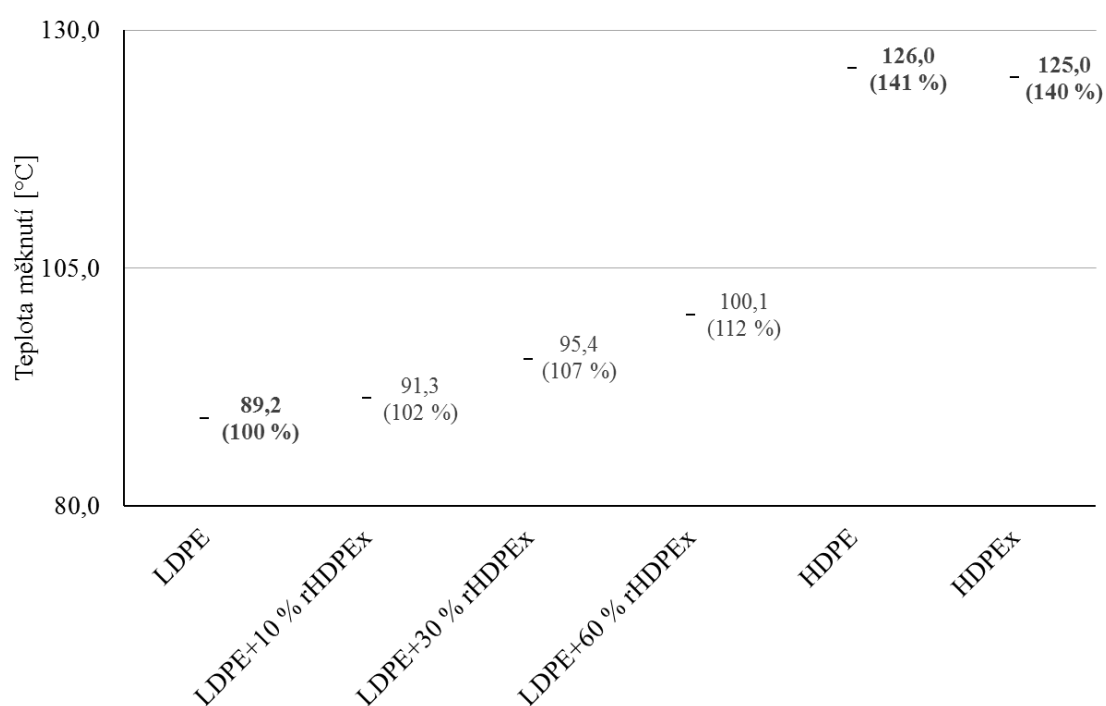
Porovnání mikrotvrdości reprezentované vtiskovou tvrdostí HIT je zobrazeno na Obr. 4.20. U původního nemodifikovaného LDPE odpovídala vtisková tvrdost hodnotě 26,85 MPa. U všech koncentrací LDPE s příměsí rHDPE<sub>x</sub> byly naměřeny hodnoty vyšší. Největší nárůst byl pozorován u maximální koncentrace plnění, u níž došlo ke vzrůstu o 62 % na 43,61 MPa. Mikrotvrdość HDPE i HDPE<sub>x</sub> je oproti všem koncentracím zkoumané směsi mnohem vyšší.



Obr. 4.20: Vtisková tvrdost

#### 4.2.2 Tepelné vlastnosti

##### Teplota měknutí dle Vicata



Obr. 4.21: Teplota měknutí

Porovnáním teploty měknutí dle Vicata je vidět pozitivní vliv plniva u všech koncentrací zkoumané směsi (Obr. 4.21). U nejnižší koncentrace došlo pouze k 2% nárůstu oproti původnímu nemoifikovanému LDPE. Dalším zvyšováním

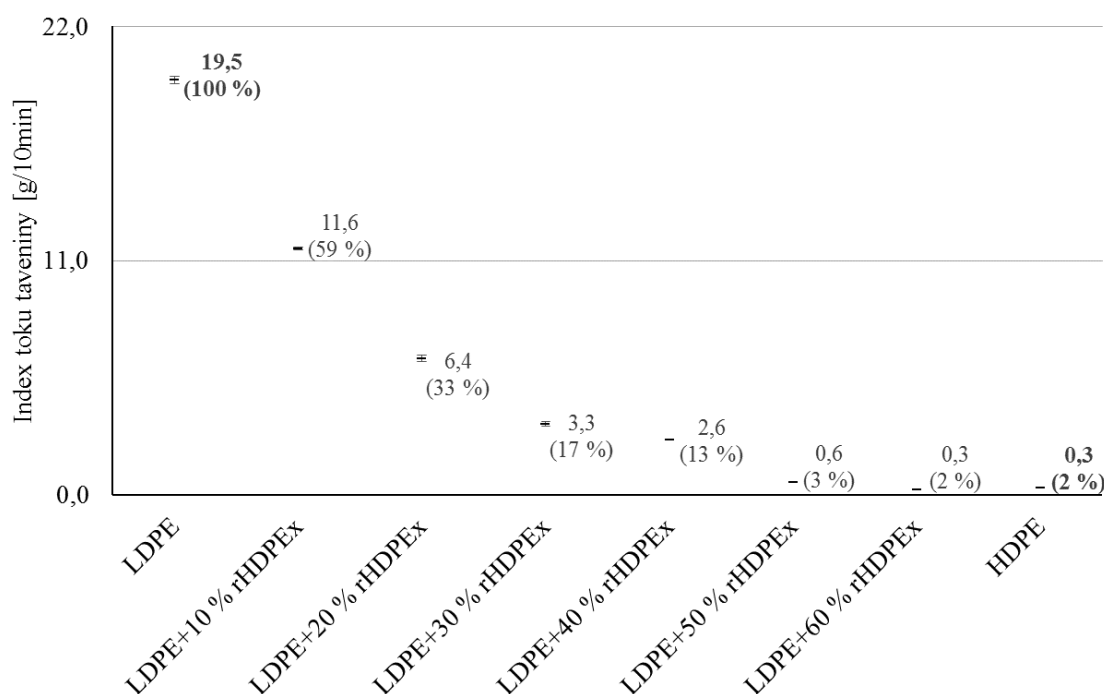
podílu plniva došlo ke vzrůstu až o 12 % u maximální koncentrace plnění. Celkově došlo ke zvýšení teploty měknutí dle Vicata z 89,2 °C na 100,1 °C.

### 4.2.3 Zpracovatelské vlastnosti

#### *Index toku taveniny*

Tab. 4.20: Naměřená data indexu toku taveniny

n = 3	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE
Aritmetický průměr [g/10min]	19,5	11,6	6,4	3,3	2,6	0,6	0,3	0,3
Medián [g/10min]	19,4	15,5	6,5	3,3	2,6	0,6	0,3	0,3
Směrodatná odchylka [g/10min]	0,3	0,1	0,3	0,2	0,04	0,01	0,01	0,005
Nejistota typu A [g/10min]	0,2	0,1	0,2	0,1	0,02	0,004	0,003	0,003
Minimum [g/10min]	19,3	11,5	6,1	3,1	2,5	0,6	0,3	0,3
Maximum [g/10min]	19,8	11,7	6,6	3,6	2,6	0,6	0,3	0,3



Obr. 4.22: Index toku taveniny

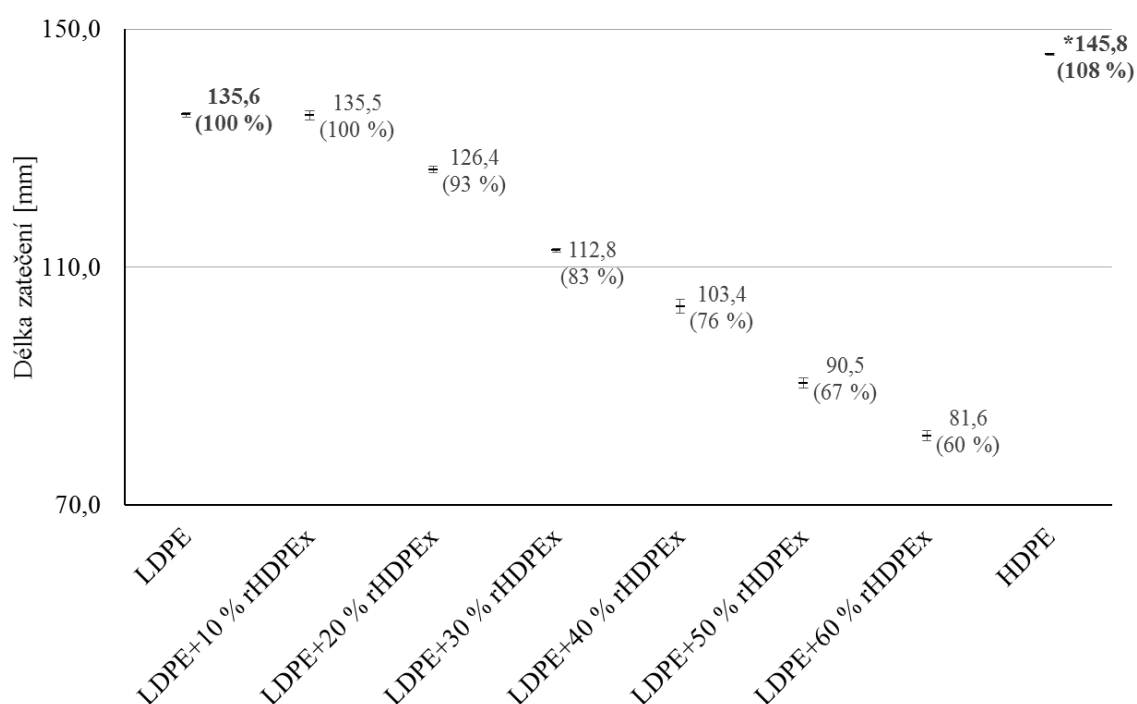
Porovnáním výsledků indexu toku taveniny lze vidět na Obr. 4.22. Již u nejnižší koncentrace plniva došlo k jeho výraznému poklesu oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Dalším zvyšováním podílu použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva klesla hodnota indexu toku taveniny až o 98 % při porovnání nejvyšší koncentrace plnění a původního nemodifikovaného LDPE. V absolutních číslech to odpovídá poklesu z 19,5 g/10min na 0,3 g/10min. Z výsledků lze také vypočítat, že index toku taveniny nejvyšší koncentrace plnění zkoumané směsi odpovídá svou velikostí původnímu nemodifikovanému HDPE.



*Délka zatečení ve spirále*

Tab. 4.21: Naměřená data délky zatečení ve spirále

n = 10	LDPE	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	HDPE
		rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	
Aritmetický průměr [mm]	135,6	135,5	126,4	112,8	103,4	90,5	81,6	145,8
Medián [mm]	136,0	136,0	126,0	112,5	104,0	90,0	82,0	146,0
Směrodatná odchylka [mm]	1,1	2,3	1,5	0,9	3,4	2,4	2,4	0,4
Nejistota typu A [mm]	0,4	0,8	0,5	0,3	1,2	0,8	0,9	0,1
Minimum [mm]	134,0	133,0	125,0	112,0	97,0	88,0	76,0	145,0
Maximum [mm]	137,0	139,0	129,0	114,0	109,0	95,0	84,0	146,0



Obr. 4.23: Délka zatečení ve spirále

Délka zatečení směsí s různou koncentrací plniva měřena na Archimédově spirále je zobrazena na Obr. 4.23. Z výsledků lze vyzorovat, že délka zatečení původního nemodifikovaného LDPE a LDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub> je téměř totožná. U všech dalších koncentrací rHDPE<sub>x</sub> je délka zatečení nižší oproti původní hodnotě. Největší pokles byl zaznamenán u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž se délka zatečení snížila ze 135,6 mm na 81,6 mm. Tento pokles odpovídá změně o 40 %.

### 4.3 Směs C - prášek LDPE + prášek rHDPE<sub>x</sub>

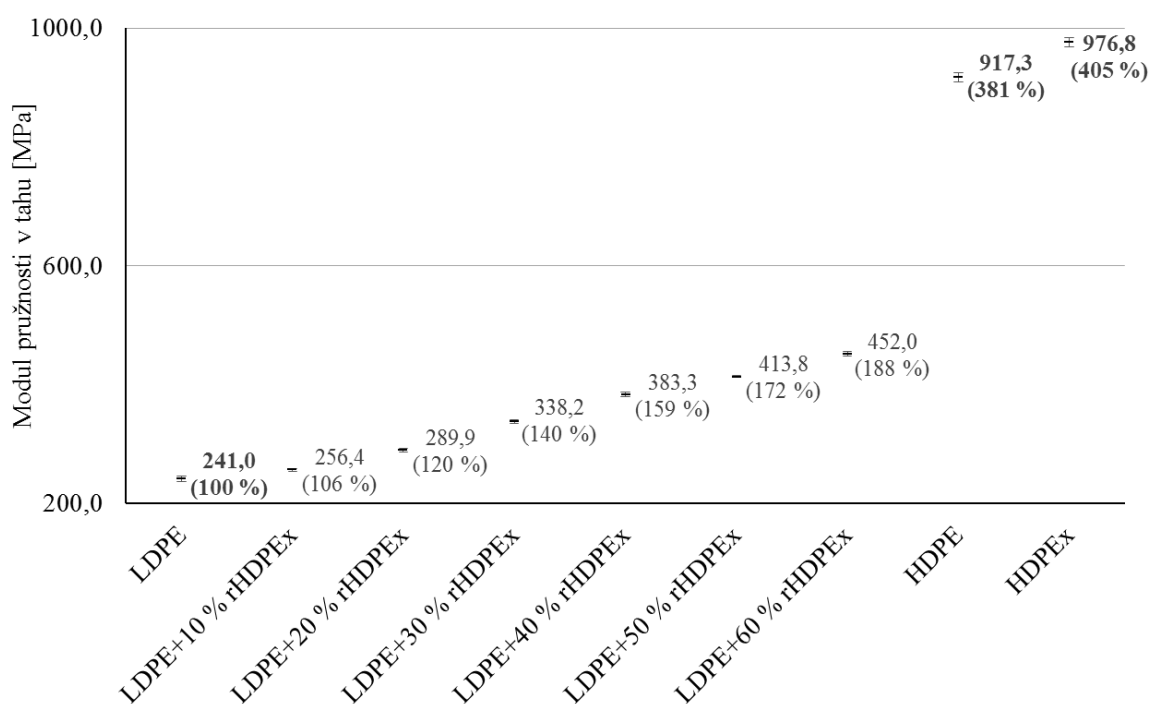
#### 4.3.1 Mechanické vlastnosti

##### Modul pružnosti v tahu $E$ za pokojové teploty

Tab. 4.22: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	241,0	256,4	289,9	338,2	383,3	413,8	452,0	917,3	976,8
Medián [MPa]	243,0	254,4	293,8	337,5	378,8	413,6	449,4	918,0	979,2
Směrodatná odchylka [MPa]	15,0	6,6	9,8	10,5	13,7	6,9	13,4	32,8	34,1
Nejistota typu A [MPa]	4,7	2,1	3,1	3,3	4,3	2,2	4,2	7,3	7,6
Minimum [MPa]	205,4	246,8	268,1	320,1	369,5	404,9	429,6	848,5	901,3
Maximum [MPa]	258,8	265,3	298,6	355,2	412,4	424,5	476,9	985,5	1021,7

Porovnání výsledků modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty u směsi C je zobrazeno na Obr. 4.24. Z výsledků lze vyzorovat pozvolný nárůst, který u nejnižší koncentrace plniva činí 6 % oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. U dalších koncentrací plnění došlo k nárůstu až o 88 % vzhledem k původní hodnotě. V absolutních číslech to odpovídá navýšení modulu pružnosti v tahu z 241 MPa na 452 MPa. Velikosti modulu pružnosti HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo.



Obr. 4.24: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty

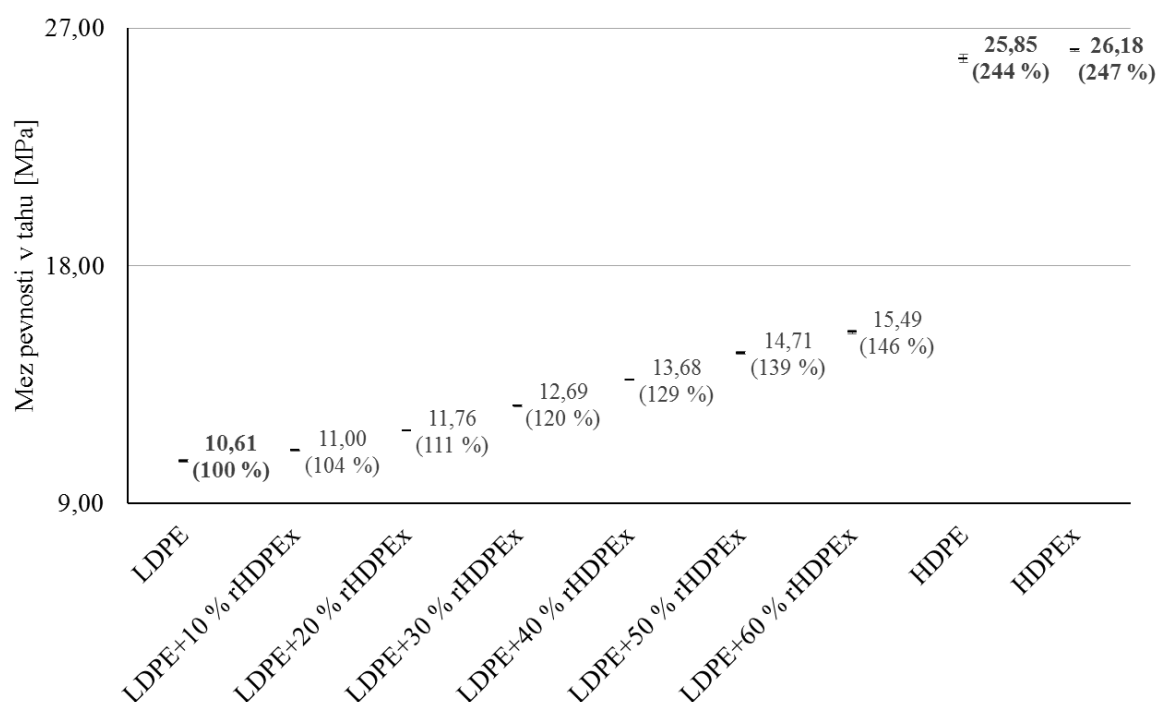
##### Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za pokojové teploty

Z výsledků meze pevnosti v tahu za pokojové teploty lze vyzorovat vzrůstající trend s rostoucí dávkou plnění (Obr. 4.25). Největší změna byla zaznamenána

u maximální koncentrace plnění, u níž došlo k nárůstu o 46 % z původních 10,61 MPa na 15,49 MPa.

Tab. 4.23: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	10,61	11,00	11,76	12,69	13,68	14,71	15,49	25,85	26,18
Medián [MPa]	10,55	11,03	11,79	12,71	13,69	14,72	15,53	25,80	26,26
Směrodatná odchylka [MPa]	0,17	0,06	0,07	0,10	0,07	0,14	0,17	0,67	0,25
Nejistota typu A [MPa]	0,06	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05	0,15	0,06
Minimum [MPa]	10,44	10,84	11,60	12,49	13,56	14,52	15,21	24,71	25,65
Maximum [MPa]	10,99	11,04	11,83	12,85	13,81	14,93	15,70	27,16	26,62



Obr. 4.25: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty

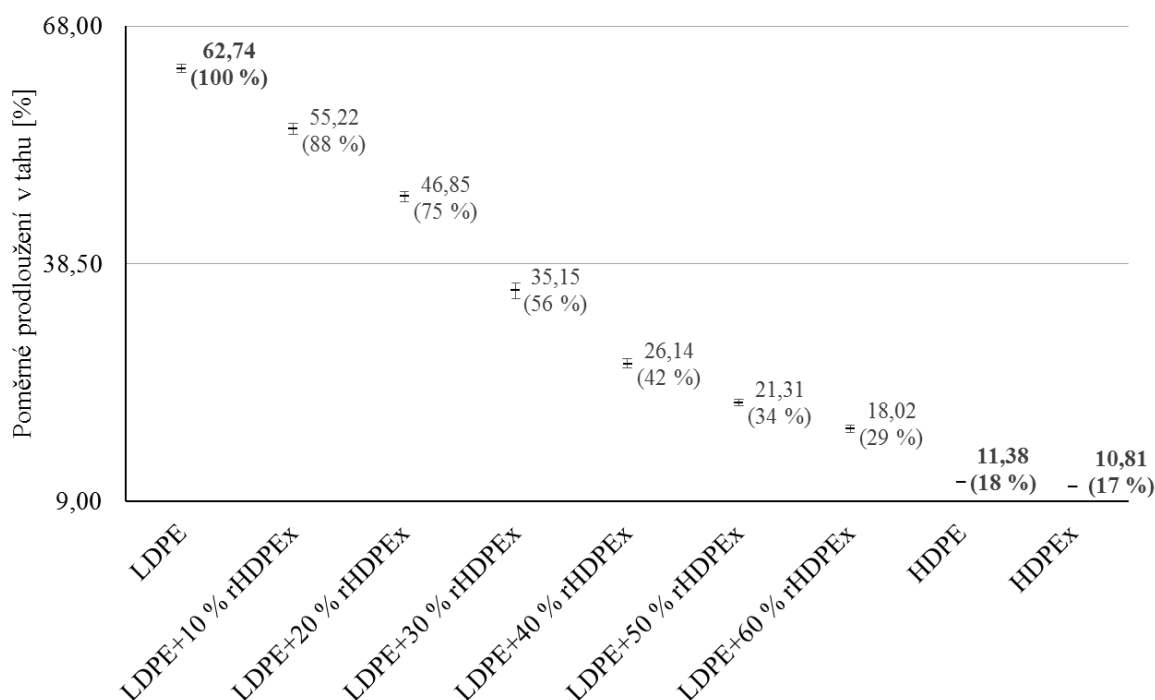
### Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za pokojové teploty

Tab. 4.24: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	62,74	55,22	46,85	35,15	26,14	21,31	18,02	11,38	10,81
Medián [%]	62,62	54,80	47,24	36,20	26,47	21,57	18,03	11,35	10,84
Směrodatná odchylka [%]	1,63	2,21	1,88	2,96	1,73	1,24	1,35	0,24	0,22
Nejistota typu A [%]	0,51	0,70	0,59	0,94	0,55	0,39	0,43	0,05	0,05
Minimum [%]	59,15	51,88	44,21	29,38	22,82	19,01	15,84	11,04	10,34
Maximum [%]	65,14	58,14	49,99	38,45	28,54	22,61	19,95	12,02	11,14

Na Obr. 4.26 je znázorněno porovnání poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty. U všech koncentrací plniva došlo ke snížení této veličiny oproti původní hodnotě. Největší pokles byl zaznamenán u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž

činil rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE 71 %. Porovnáním výsledků s HDPE i HDPE<sub>x</sub> lze konstatovat, že u těchto dvou materiálů jsou hodnoty poměrného prodloužení ještě nižší.



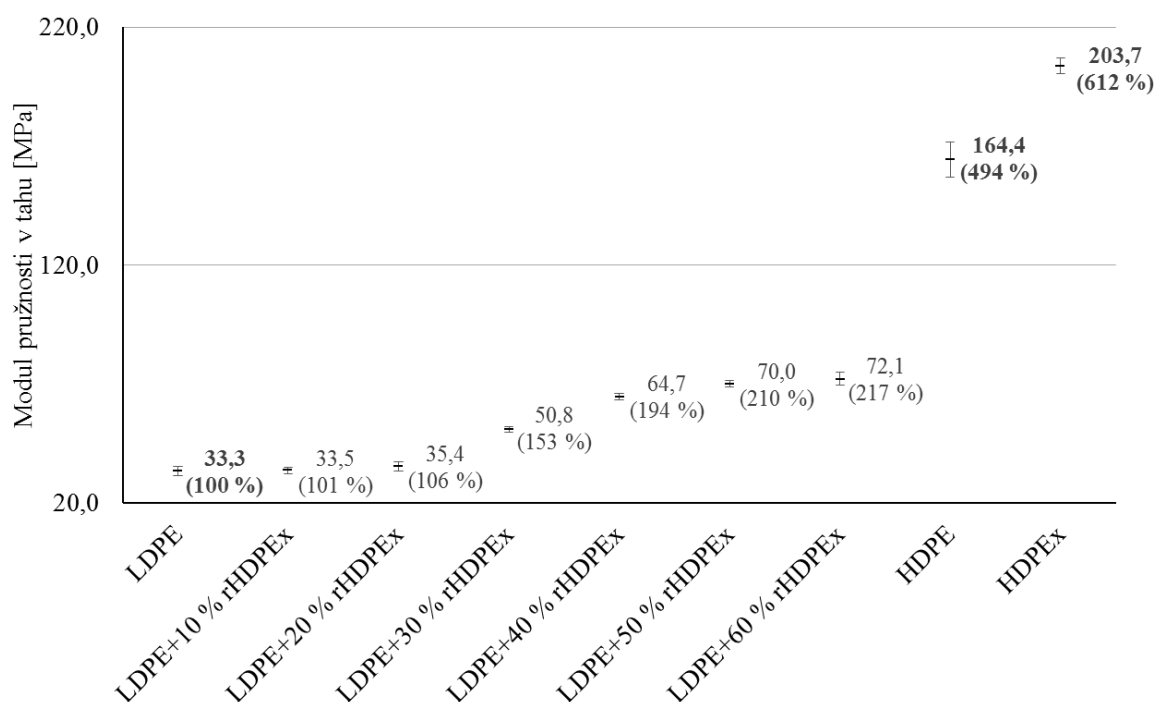
Obr. 4.26: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty

### Modul pružnosti v tahu $E$ za zvýšené teploty

Tab. 4.25: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	33,3	33,5	35,4	50,8	64,7	70,0	72,1	164,4	203,7
Medián [MPa]	33,4	34,4	37,0	51,4	63,9	70,3	73,3	164,5	203,7
Směrodatná odchylka [MPa]	6,4	4,8	6,3	3,7	4,5	4,2	8,5	20,9	11,5
Nejistota typu A [MPa]	2,0	1,5	2,0	1,2	1,4	1,3	2,7	7,4	3,3
Minimum [MPa]	21,5	26,1	26,2	45,1	60,6	61,7	60,6	137,4	184,7
Maximum [MPa]	43,2	41,8	43,6	56,4	76,8	75,9	85,1	192,5	221,8

Vliv použitého plniva na modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty je zobrazena na Obr. 4.27. Z výsledků vyplývá, že u koncentrací plnění 10 a 20 % je nárůst pouze v jednotkách procent. K výraznému nárůstu došlo až u koncentrace 30 %, u něž činí rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE více než 50 %. U vyšších koncentrací je zachován rostoucí trend. Maximum bylo zaznamenáno u LDPE s 60% podílem rHDPE<sub>x</sub> plniva. U této koncentrace činí rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE 117 %, což odpovídá změně z 33,3 MPa na 72,1 MPa. Hodnoty modulu pružnosti HDPE a HDPE<sub>x</sub> odpovídají zhruba dvou-, resp. trojnásobku hodnoty LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>.



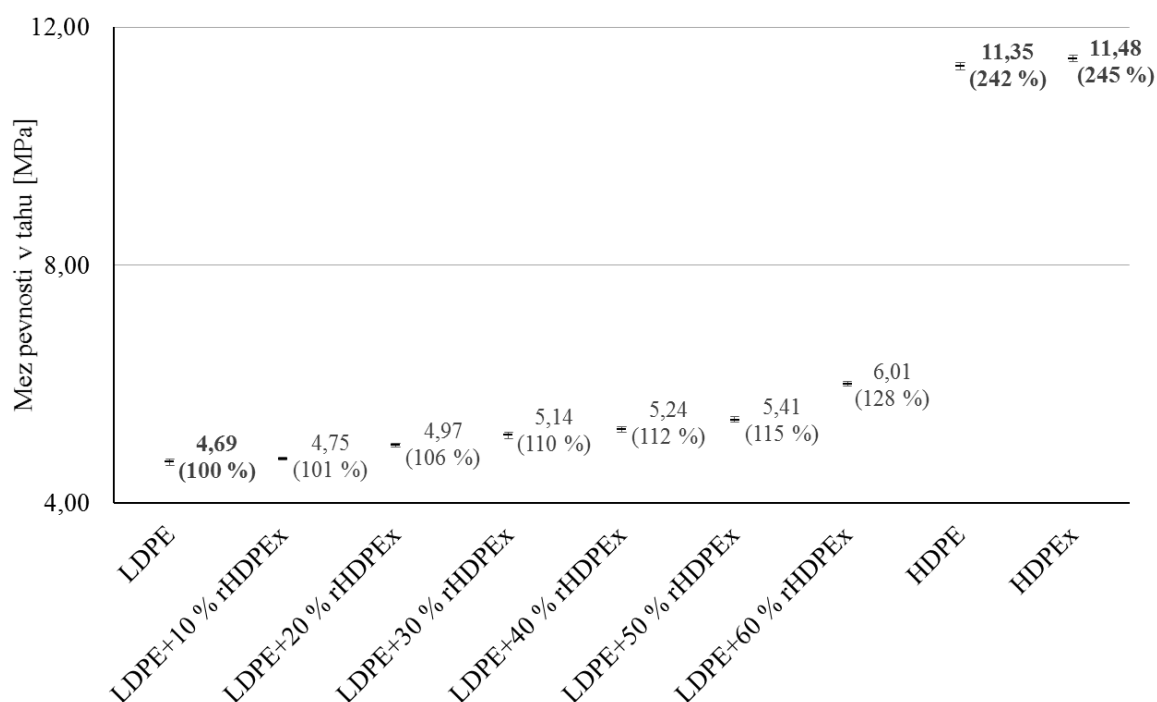
Obr. 4.27: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty

**Mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  za zvýšené teploty**

Tab. 4.26: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	4,69	4,75	4,97	5,14	5,24	5,41	6,01	11,35	11,48
Medián [MPa]	4,71	4,75	4,99	5,15	5,26	5,39	6,00	11,41	11,52
Směrodatná odchylka [MPa]	0,17	0,09	0,11	0,17	0,13	0,16	0,13	0,23	0,19
Nejistota typu A [MPa]	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05
Minimum [MPa]	4,41	4,58	4,77	4,90	5,02	5,15	5,79	11,00	10,96
Maximum [MPa]	4,92	4,86	5,15	5,40	5,42	5,65	6,20	11,71	11,68

Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty rostla pouze pozvolně (viz. Obr. 4.28). U koncentrací 10 až 30 % je nárůst pouze v jednotkách procent. Největší změna byla naměřena u maximální koncentrace plniva, u něhož vzrostla mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty ze 4,69 MPa na 6,01 MPa. Tento nárůst odpovídá změně téměř 30 % oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. HDPE i HDPE<sub>x</sub> mají hodnoty meze pevnosti v tahu výrazně vyšší.



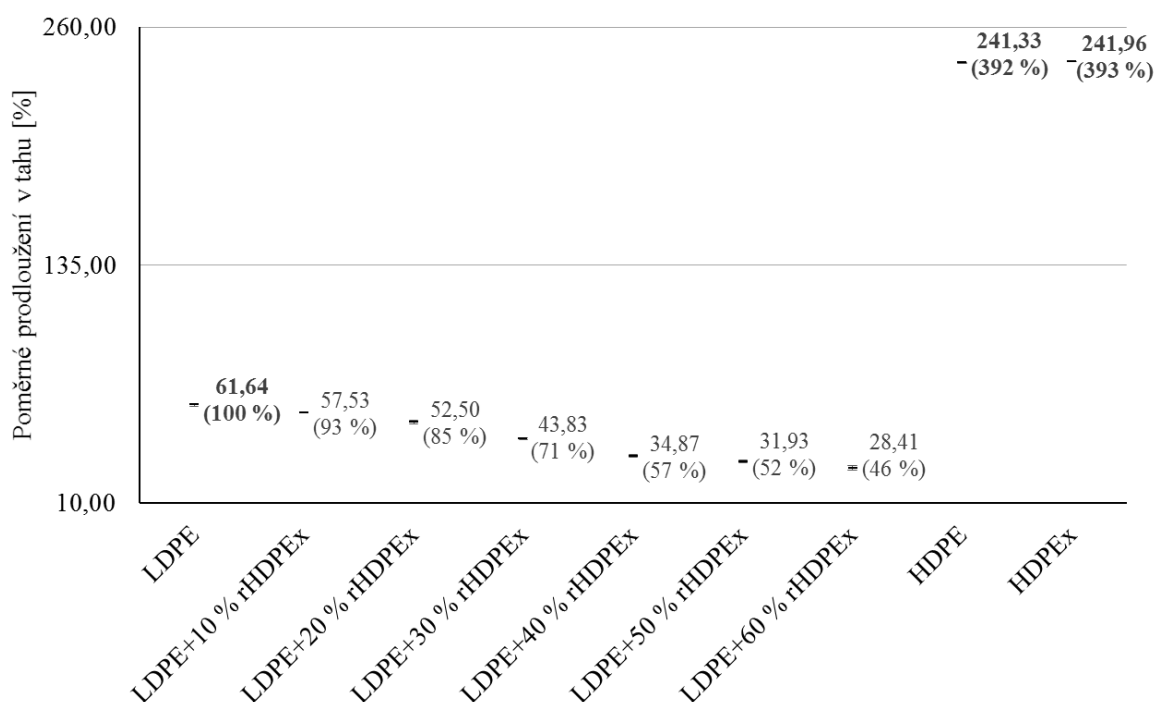
Obr. 4.28: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty

**Poměrné prodloužení v tahu  $\varepsilon_M$  za zvýšené teploty**

Tab. 4.27: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	61,64	57,53	52,50	43,83	34,87	31,93	28,41	241,33	241,96
Medián [%]	62,51	57,25	52,23	43,65	34,65	32,34	28,90	241,72	242,00
Směrodatná odchylka [%]	2,32	1,10	2,49	1,49	2,45	2,50	3,89	0,72	0,08
Nejistota typu A [%]	0,73	0,35	0,79	0,47	0,77	0,79	1,23	0,20	0,02
Minimum [%]	57,56	56,39	49,35	41,57	31,02	27,63	22,80	240,39	241,84
Maximum [%]	64,40	59,86	58,27	46,94	38,17	35,10	33,59	242,05	242,06

Porovnáním poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty lze pozorovat, že s rostoucí dávkou dochází k jeho poklesu (viz. Obr. 4.29). Nejnižší hodnota poměrného prodloužení v tahu byly opět zaznamenána u nejvyšší koncentrace plniva, kde je rozdíl mezi původním nemodifikovaným LDPE 54 %. Výsledek koreluje s výsledky modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu.



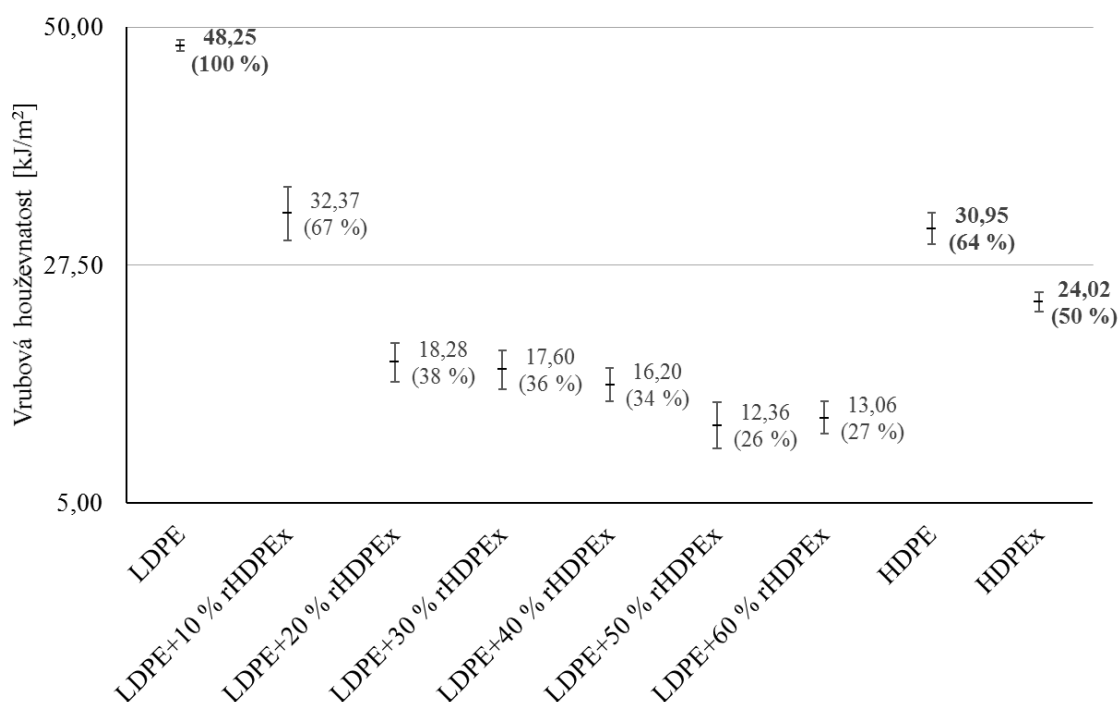
Obr. 4.29: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty

### Maximální vrubová houževnatost $A_M$

Tab. 4.28: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	48,25	32,37	18,28	17,60	16,20	12,36	13,06	30,95	24,02
Medián [kJ/m <sup>2</sup> ]	48,75	34,29	19,69	19,85	18,51	11,50	14,05	31,96	23,96
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,12	5,65	4,06	4,14	3,55	4,87	3,44	3,34	2,04
Nejistota typu A [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,50	2,53	1,82	1,85	1,59	2,18	1,54	1,49	0,91
Minimum [kJ/m <sup>2</sup> ]	47,00	23,80	11,12	11,95	11,35	7,21	8,10	27,49	20,88
Maximum [kJ/m <sup>2</sup> ]	49,29	38,00	21,10	20,94	18,85	19,70	16,08	35,02	26,00

Na Obr. 4.30 jsou zobrazeny výsledky vrubové houževnatosti zkoumané směsi. Již u 10% koncentrace plnění došlo ke skokovému poklesu houževnatosti oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Zvýšením podílu rHDPE<sub>x</sub> na 20 % došlo k opětovnému skokovému snížení. U dalších koncentrací klesala vrubová houževnatost už jen pozvolně. Minimum bylo pozorováno u LDPE s 50 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž klesla maximální vrubová houževnatost ze 48,25 kJ/m<sup>2</sup> na 12,36 kJ/m<sup>2</sup>. Tento pokles odpovídá změně o 74 %.



Obr. 4.30: Maximální vrubová houževnatost

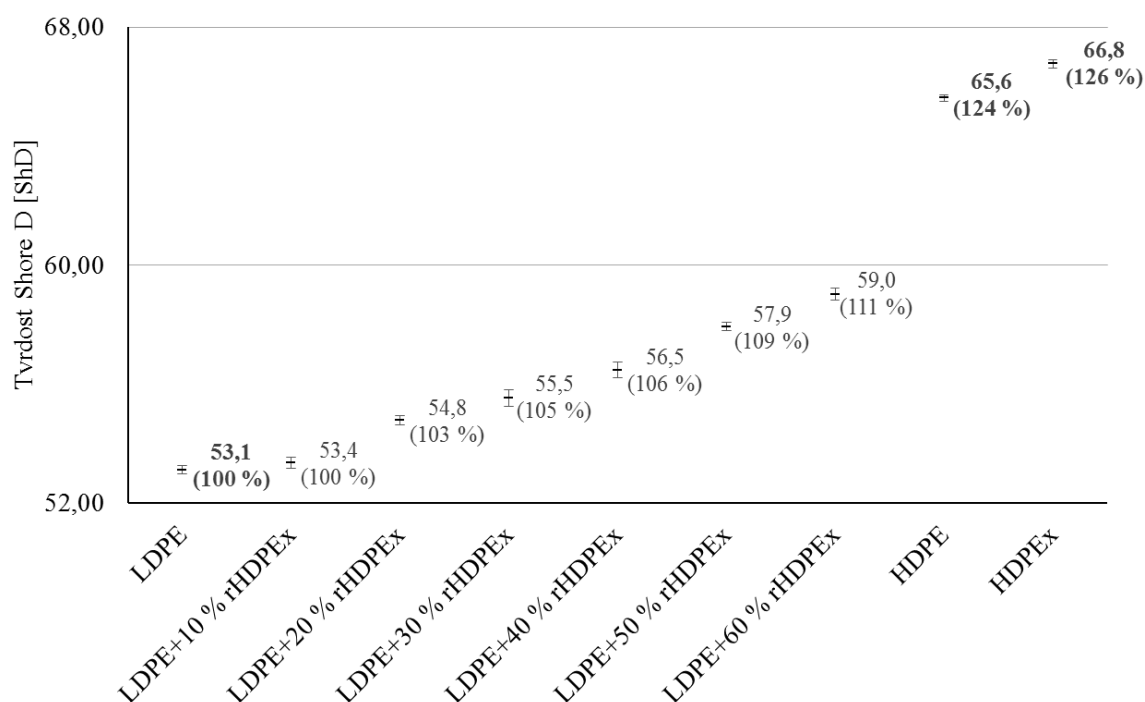
### Tvrdość Shore D

Tab. 4.29: Naměřená data tvrdosti Shore D

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [ShD]	53,1	53,4	54,8	55,5	56,5	57,9	59,0	65,6	66,8
Medián [ShD]	53,2	53,5	57,7	55,6	56,3	57,9	59,0	65,7	66,8
Směrodatná odchylka [ShD]	0,5	0,6	0,5	0,9	0,8	0,5	0,7	0,4	0,4
Nejistota typu A [ShD]	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1
Minimum [ShD]	52,4	52,3	54,1	54,6	55,5	57,2	58,1	64,9	66,2
Maximum [ShD]	53,8	54,1	55,7	57,2	58,1	58,6	60,4	66,1	67,5

Tvrdość materiálu reprezentovaná tvrdostí typu Shore D je znázorněna na Obr. 4.31. Vliv plniva je až do jeho 50% koncentrace velmi malý. Nárůst tvrdosti je pouze v rámci jednotek procent, ale i tak lze pozorovat pozitivní vliv. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u maximální koncentrace plnění, kde Shore D tvrdost vzrostla z 53,1 ShD na 59 ShD při porovnání s původním nemodifikovaným LDPE. HDPE i HDPE<sub>x</sub> mají hodnoty tvrdosti vyšší.





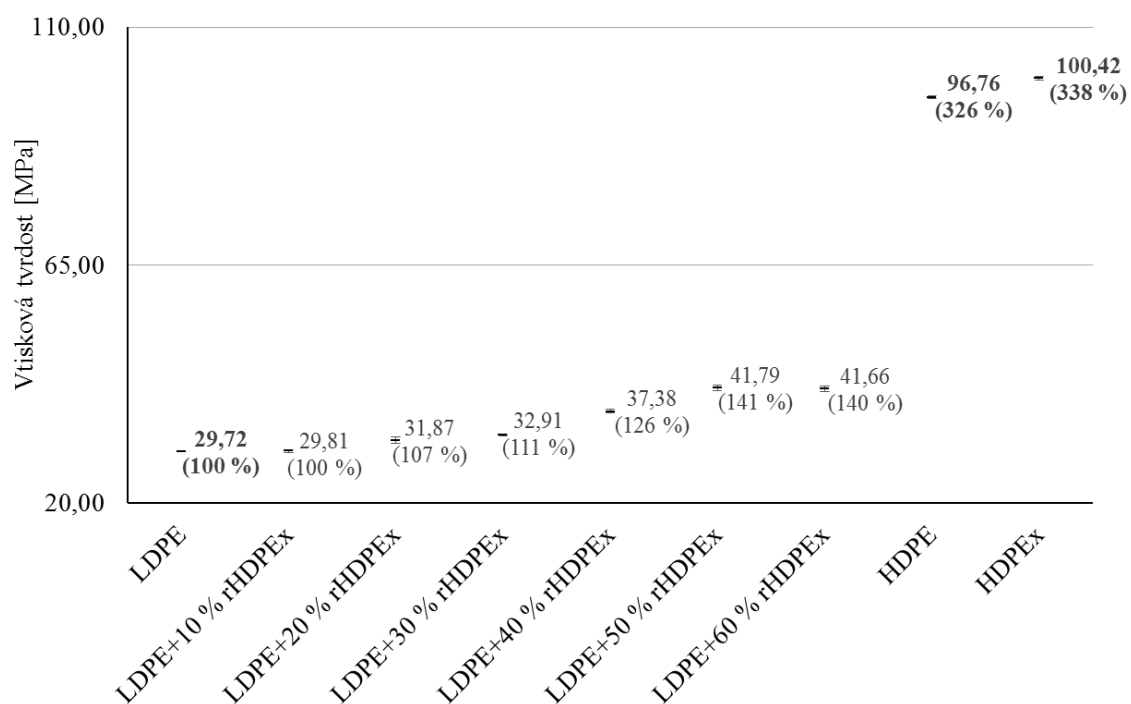
Obr. 4.31: Tvrdość Shore D

**Mikrotvrdość**

Tab. 4.30: Naměřená data vtiskové tvrdosti

n = 10	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	29,72	29,81	31,87	32,91	37,38	41,79	41,66	96,76	100,42
Medián [MPa]	29,68	29,98	32,21	32,60	37,54	42,10	41,27	96,68	100,41
Směrodatná odchylka [MPa]	0,09	0,29	0,28	0,39	0,46	0,31	0,46	0,91	1,15
Nejistota typu A [MPa]	0,04	0,31	0,57	0,17	0,32	0,44	0,53	0,29	0,37
Minimum [MPa]	29,42	28,58	30,67	31,66	35,53	39,56	39,81	95,45	98,72
Maximum [MPa]	30,32	31,14	33,03	35,97	39,74	42,59	44,50	98,24	102,32

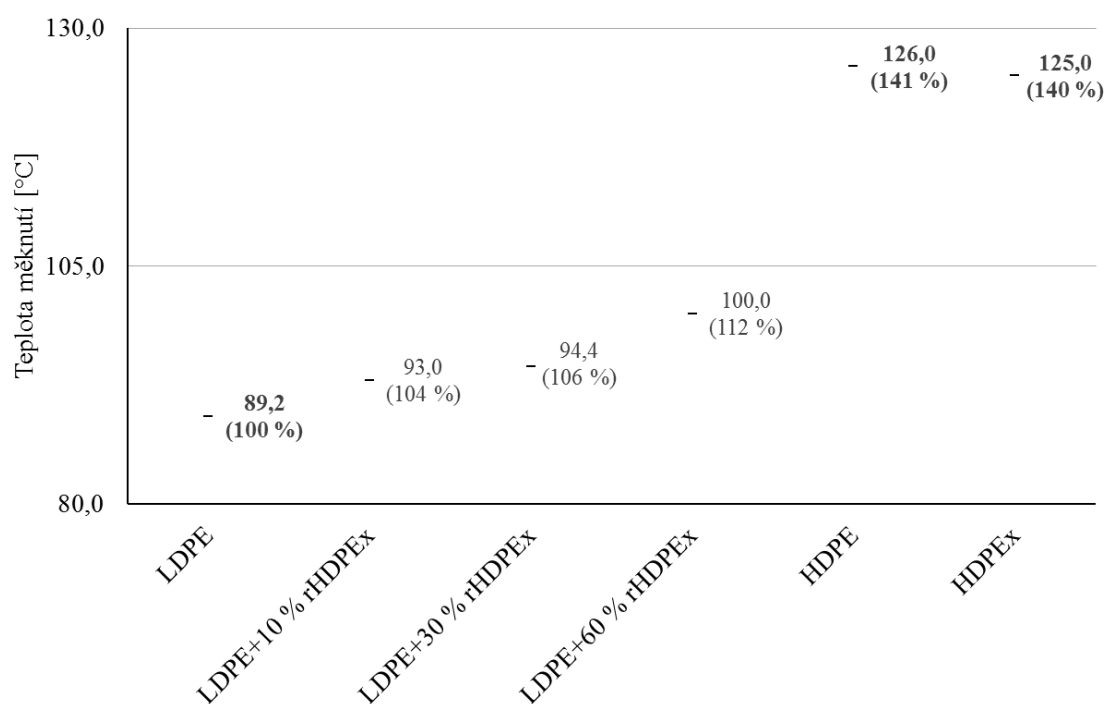
Výsledky vtiskové tvrdosti HIT sloužící k porovnání mikrotvrdości zkoumaných materiálů jsou zobrazeny na Obr. 4.32. Největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u LDPE s 50 % použitého plniva, u něž tato hodnota vzrostla z 29,72 MPa na 41,79 MPa. Porovnáním výsledků dané směsi s HDPE, resp. HDPE<sub>x</sub> je vidět, že jejich vtisková tvrdost je více než dvojnásobná.



Obr. 4.32: Vtisková tvrdost

### 4.3.2 Tepelné vlastnosti

#### Teplota měknutí dle Vicata



Obr. 4.33: Teplota měknutí

Tepelné vlastnosti zastoupené teplotou měknutí dle Vicata jsou zobrazeny na Obr. 4.33. Z naměřených hodnot vyplývá, že došlo k jejímu zvýšení z 89,2 °C na

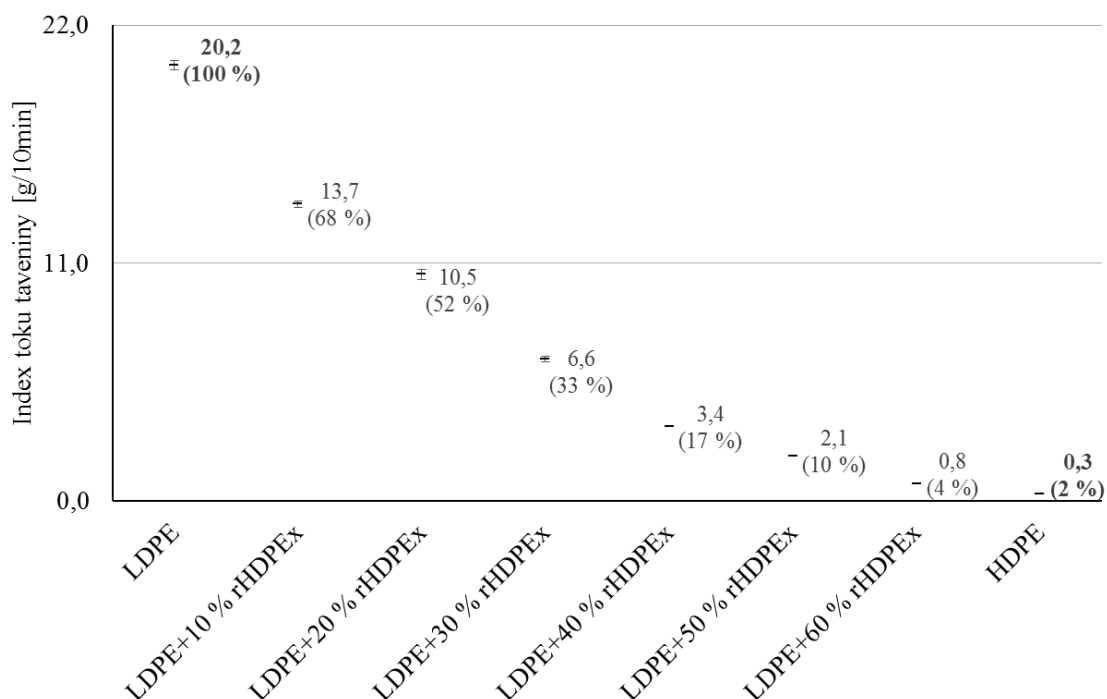
100 °C při porovnání původního nemodifikovaného LDPE a LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>. Hodnot teploty měknutí HDPE ani HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo.

### 4.3.3 Zpracovatelské vlastnosti

#### Index toku taveniny

Tab. 4.31: Naměřená data indexu toku taveniny

n = 3	LDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	20 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	40 % rHDPE <sub>x</sub>	50 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE
Aritmetický průměr [g/10min]	20,2	13,7	10,5	6,6	3,4	2,1	0,8	0,3
Medián [g/10min]	20,0	13,6	10,6	6,5	3,5	2,1	0,8	0,3
Směrodatná odchylka [g/10min]	0,4	0,3	0,4	0,2	0,04	0,01	0,01	0,005
Nejistota typu A [g/10min]	0,2	0,1	0,2	0,1	0,02	0,01	0,003	0,003
Minimum [g/10min]	19,9	13,5	10,0	6,4	3,4	2,1	0,8	0,3
Maximum [g/10min]	20,6	14,0	10,8	6,7	3,5	2,1	0,8	0,3



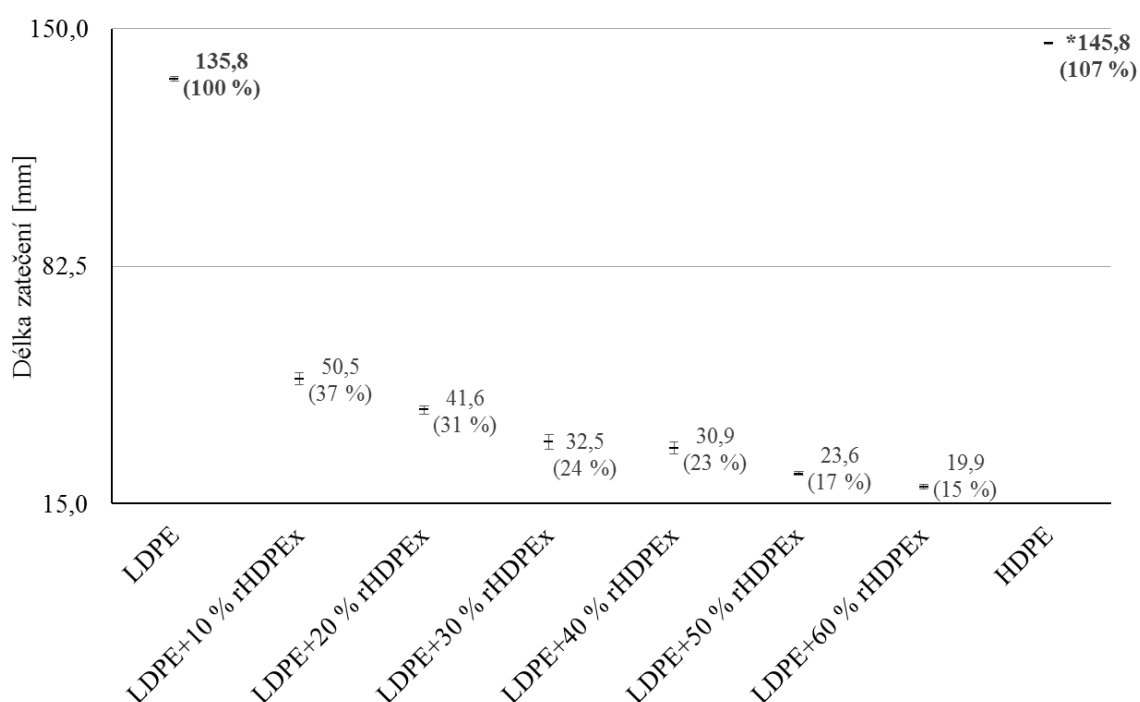
Obr. 4.34: Index toku taveniny

Porovnáním hodnot indexu toku taveniny lze konstatovat klesající tendenci s rostoucím podílem plniva (viz. Obr. 4.34). Již u nejnižší koncentrace plnění došlo k výraznému poklesu oproti původnímu nemodifikovanému LDPE. Dramatický poklesu indexu toku taveniny dosáhl svého maxima u nejvyšší koncentrace plnění. U této koncentrace klesla jeho hodnota až o 96 % své původní hodnoty. V absolutních hodnotách to odpovídá poklesu z 20,2 g/10min na 0,8 g/10min. Naměřená hodnota HDPE odpovídá své tabulkové hodnotě 0,3 g/10min.

*Délka zatečení ve spirále*

Tab. 4.32: Naměřená data délky zatečení ve spirále

n = 10	LDPE	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	HDPE
		rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	
Aritmetický průměr [mm]	135,8	50,5	41,6	32,5	30,9	23,6	19,9	145,8
Medián [mm]	136,0	49,0	41,0	34,0	32,0	24,0	20,0	146,0
Směrodatná odchylka [mm]	1,8	4,6	3,7	6,0	5,0	1,3	1,6	0,4
Nejistota typu A [mm]	0,6	1,6	1,3	2,1	1,8	0,5	0,6	0,1
Minimum [mm]	133,0	45,0	38,0	25,0	24,0	22,0	17,0	145,0
Maximum [mm]	139,0	58,0	50,0	42,0	36,0	26,0	22,0	146,0



Obr. 4.35: Délka zatečení ve spirále

Při měření tokových vlastností na spirále byl již u nejnižší koncentrace zaznamenán dramatický pokles o 63 % oproti své původní hodnotě (Obr. 4.35). Dalším zvyšování koncentrace plniva docházelo k pozvolnějšímu snižování délky zatečení až na 15 % své původní hodnoty. Celkově klesla délka zatečení zkoumané směsi z 135,8 mm u původního nemodifikovaného LDPE na 19,9 mm u LDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>.

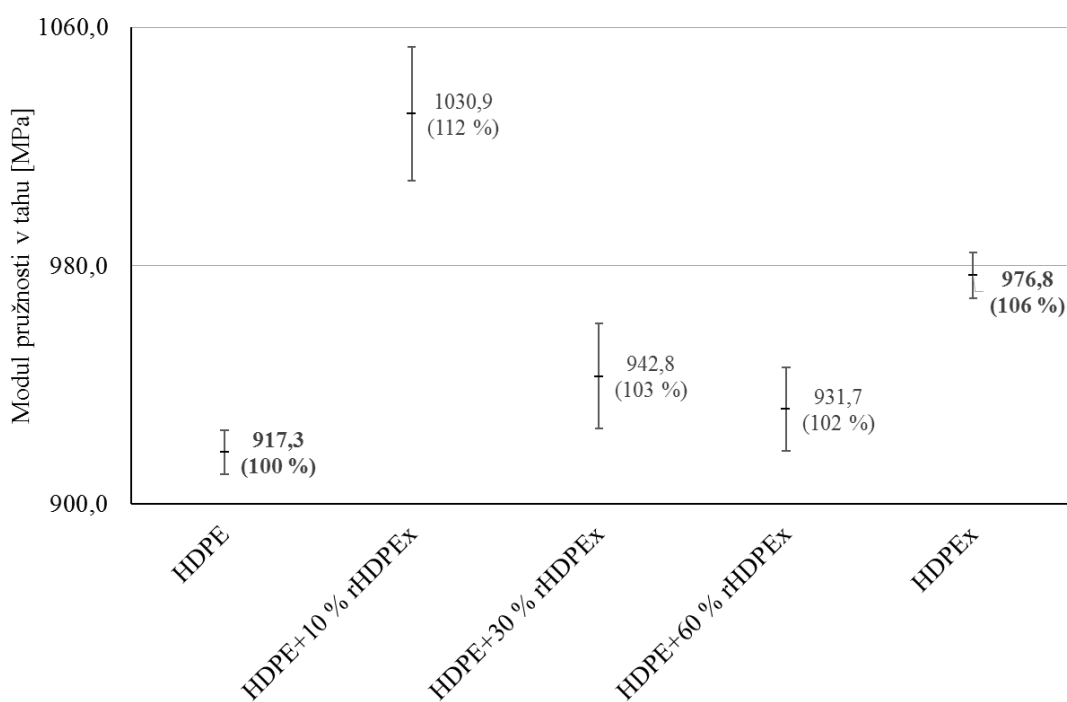
## 4.4 Směs D - granulát HDPE + drt' rHDPE<sub>x</sub>

### 4.4.1 Mechanické vlastnosti

#### Modul pružnosti v tahu $E$ za pokojové teploty

Tab. 4.33: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	917,3	1030,9	942,8	931,7	976,8
Medián [MPa]	918,0	1034,9	944,6	927,7	979,2
Směrodatná odchylka [MPa]	32,8	71,0	55,9	44,7	34,1
Nejistota typu A [MPa]	7,3	22,5	17,7	14,1	7,6
Minimum [MPa]	848,5	908,7	843,9	881,0	901,3
Maximum [MPa]	985,5	1135,7	1046,4	1038,5	1021,7



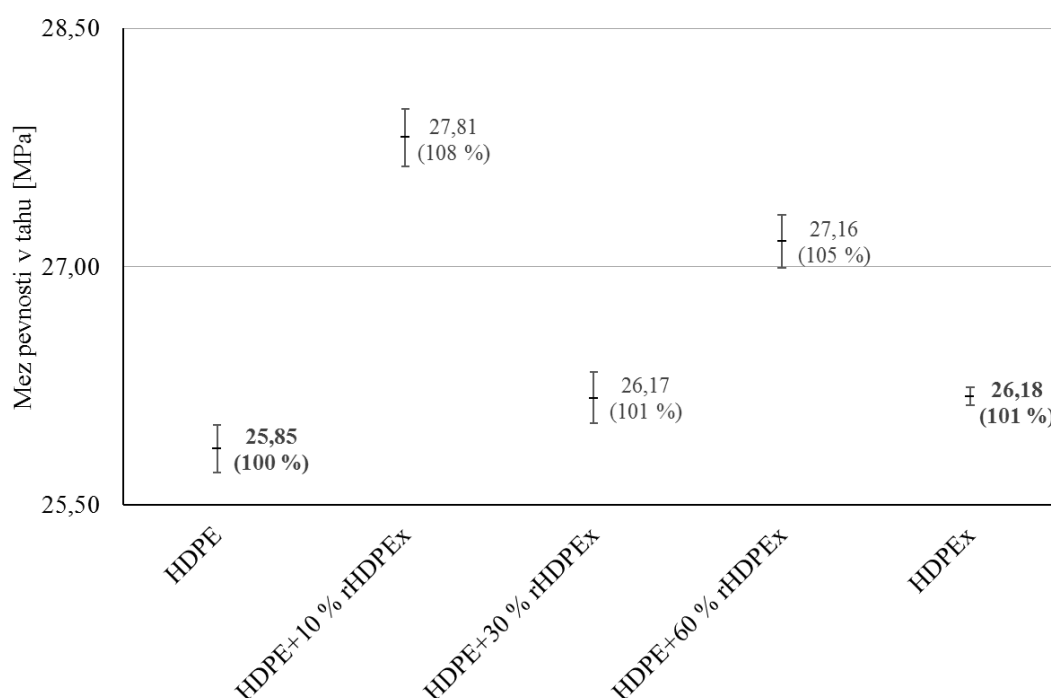
Obr. 4.36: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty

Z naměřených výsledků modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty lze na Obr. 4.36 vidět, že u koncentrace plniva 10 % došlo k nárůstu o 12 % oproti původnímu nemodifikovanému HDPE. U dalších koncentrací plnění byl naměřen nárůst pouze v rámci jednotek procent oproti původní hodnotě, i tak byl pozitivní účinek použitého plniva zachován. Modul pružnosti HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub> vzrostl z 917,3 MPa až na 1030,9 MPa, čímž došlo k překročení velikosti modulu pružnosti v tahu i původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub>.

**Mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  za pokojové teploty**

Tab. 4.34: Naměřená data meze pevnosti za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	25,85	27,81	26,17	27,16	26,18
Medián [MPa]	25,80	27,80	26,17	27,10	26,26
Směrodatná odchylka [MPa]	0,67	0,57	0,51	0,52	0,25
Nejistota typu A [MPa]	0,15	0,18	0,16	0,17	0,06
Minimum [MPa]	24,71	26,92	25,18	26,40	25,65
Maximum [MPa]	27,16	28,62	27,01	27,99	26,62



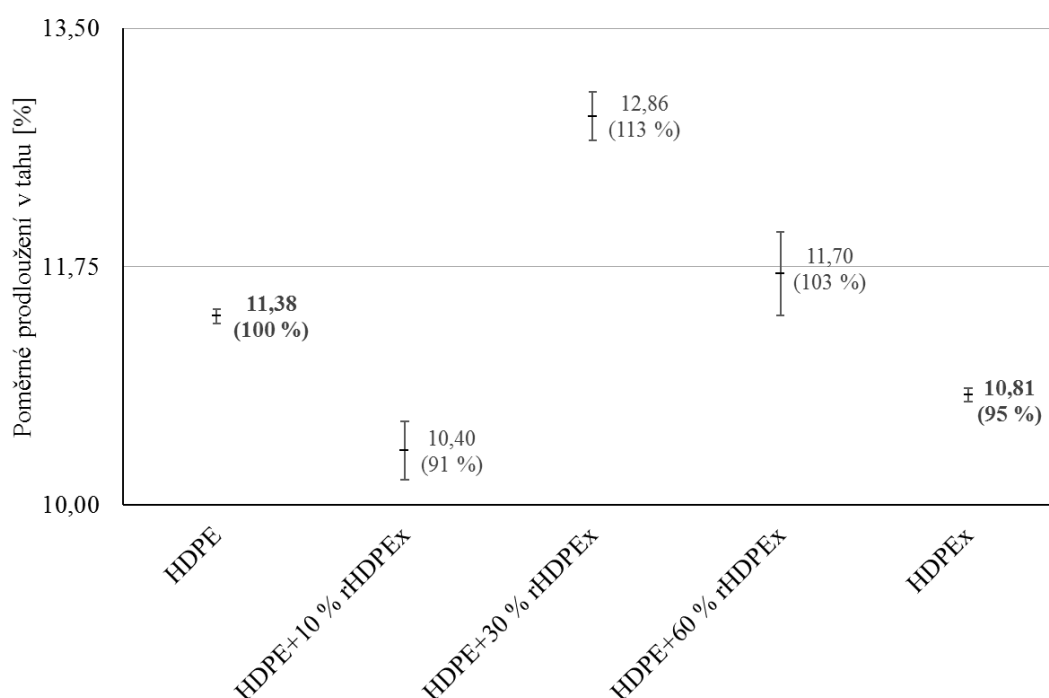
Obr. 4.37: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty

Vliv použitého plniva na mez pevnosti v tahu za pokojové teploty je znázorněn na Obr. 4.37. Porovnáním naměřených hodnot je možné konstatovat, že u všech koncentrací plniva došlo ke zvýšení meze pevnosti v tahu oproti původnímu nemodifikovanému HDPE. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž došlo ke zvýšení z 25,85 MPa na 27,81 MPa. Toto navýšení odpovídá změně o 10 %. Mez pevnosti v tahu původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub> je přibližně stejná nebo dokonce nižší než mez pevnosti v tahu jednotlivých koncentrací zkoumané směsi.

**Poměrné prodloužení v tahu  $\varepsilon_M$  za pokojové teploty**

Tab. 4.35: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	11,38	10,40	12,86	11,70	10,81
Medián [%]	11,35	10,60	12,93	11,85	10,84
Směrodatná odchylka [%]	0,24	0,67	0,56	0,97	0,22
Nejistota typu A [%]	0,05	0,21	0,18	0,31	0,05
Minimum [%]	11,04	9,51	11,45	10,44	10,34
Maximum [%]	12,02	11,48	13,59	13,04	11,14



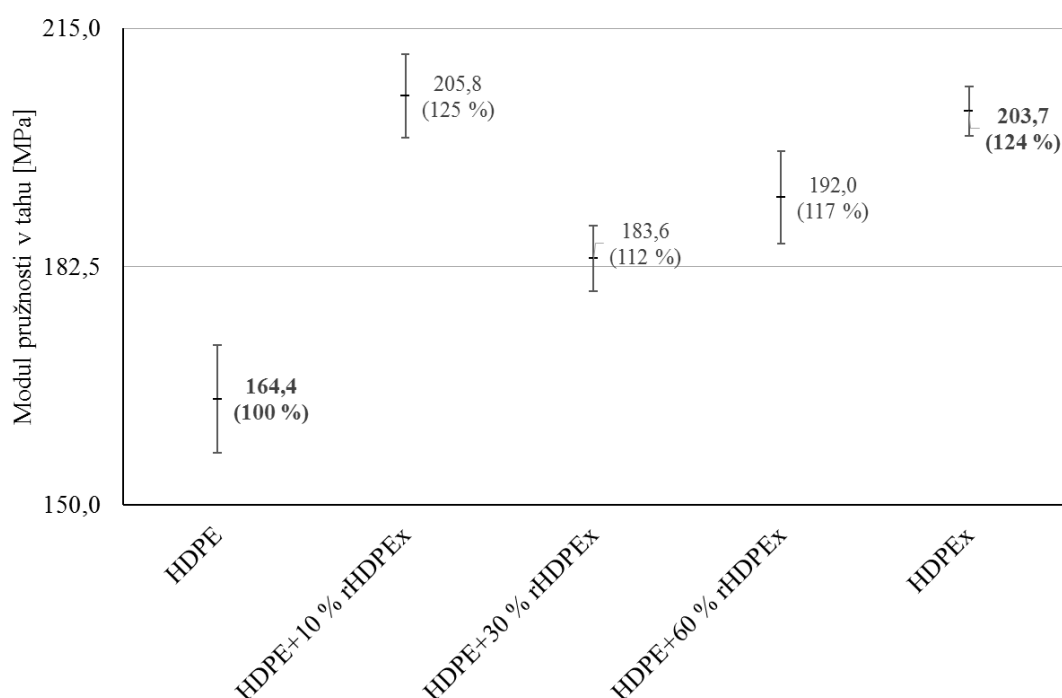
Obr. 4.38: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty

U poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty nelze jednoznačně určit vliv použitého plniva (Obr. 4.38). U nejnižší koncentrace plnění došlo k poklesu o 9 % vzhledem k původnímu nemodifikovanému HDPE. U dalších koncentrací plniva došlo naopak k nárůstu až o 13 % oproti původní hodnotě. Porovnáním výsledků s původním modifikovaným HDPE<sub>x</sub> lze konstatovat, že u 10 % koncentrace plnění je poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty přibližně stejné. U koncentrací plniva 30 a 60 % je poměrné prodloužení v tahu vyšší.

**Modul pružnosti v tahu  $E$  za zvýšené teploty**

Tab. 4.36: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	164,4	205,8	183,6	192,0	203,7
Medián [MPa]	164,5	205,6	180,9	190,2	203,7
Směrodatná odchylka [MPa]	20,9	18,1	14,0	20,0	11,5
Nejistota typu A [MPa]	7,4	5,7	4,4	6,3	3,3
Minimum [MPa]	137,4	168,1	158,8	164,4	184,7
Maximum [MPa]	192,5	243,3	206,0	228,2	221,8



Obr. 4.39: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty

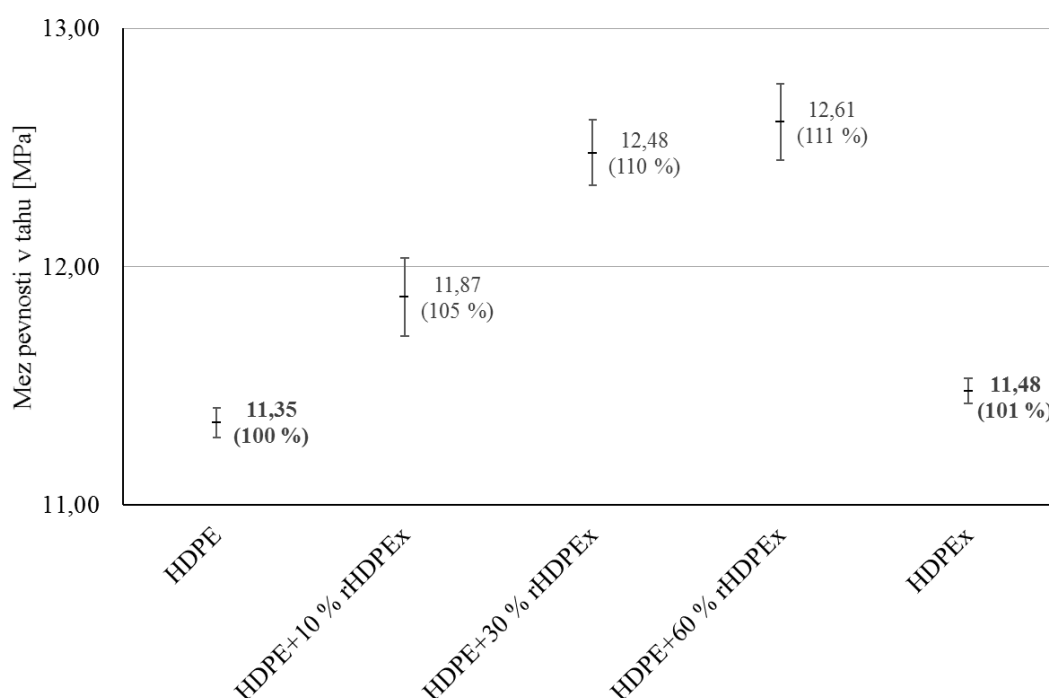
Hodnoty modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty jsou u všech tří koncentrací zkoumané směsi vyšší než hodnota původního nemodifikovaného HDPE. Je tedy vidět, že pozitivní účinek použitého plniva zůstal nezměněn i za zvýšené teploty. Maximum bylo naměřeno u HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž došlo k nárůstu z 164,4 MPa na 205,8 MPa, což odpovídá skokovému zvýšení o 25 % (viz. Obr. 4.39).



*Mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  za zvýšené teploty*

Tab. 4.37: Naměřená data meze pevnosti za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	11,35	11,87	12,48	12,61	11,48
Medián [MPa]	11,41	11,84	12,53	12,57	11,52
Směrodatná odchylka [MPa]	0,23	0,52	0,43	0,51	0,19
Nejistota typu A [MPa]	0,06	0,16	0,14	0,16	0,05
Minimum [MPa]	11,00	11,25	11,47	12,03	10,96
Maximum [MPa]	11,71	12,75	12,97	13,71	11,68



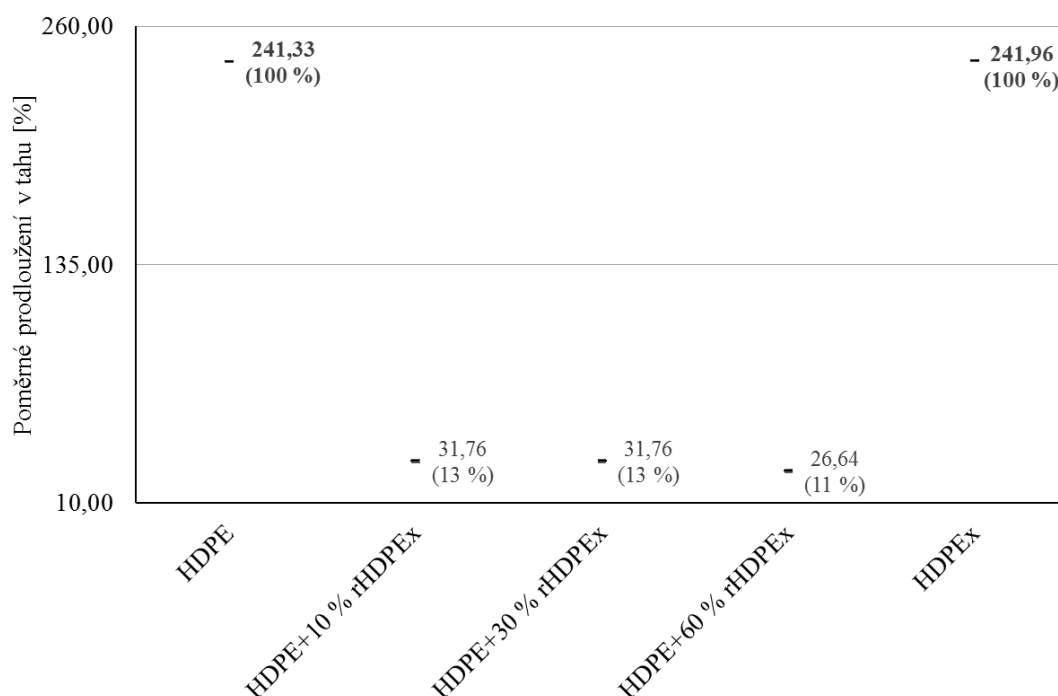
Obr. 4.40: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty

Při srovnání mezí pevnosti v tahu za zvýšené teploty lze pozorovat, že s rostoucím obsahem použitého plniva dochází k jejímu nárůstu (Obr. 4.40). Největší nárůst byl naměřen u HDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>. Mez pevnosti v tahu u něj vzrostla z původních 11,35 MPa na 12,61 MPa, což odpovídá nárůstu o 11 %. Z výsledků je také patrné, že u všech koncentrací zkoumané směsi jsou hodnoty meze pevnosti v tahu vyšší než mez pevnosti v tahu původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub>.

**Poměrné prodloužení v tahu  $\varepsilon_M$  za zvýšené teploty**

Tab. 4.38: Naměřená data poměrného prodloužení za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	241,33	31,76	31,76	26,64	241,96
Medián [%]	241,72	30,87	30,96	26,17	242,00
Směrodatná odchylka [%]	0,72	2,08	2,61	1,88	0,08
Nejistota typu A [%]	0,20	0,66	0,83	0,59	0,02
Minimum [%]	240,39	29,64	27,44	23,96	241,84
Maximum [%]	242,05	34,81	35,39	30,80	242,06



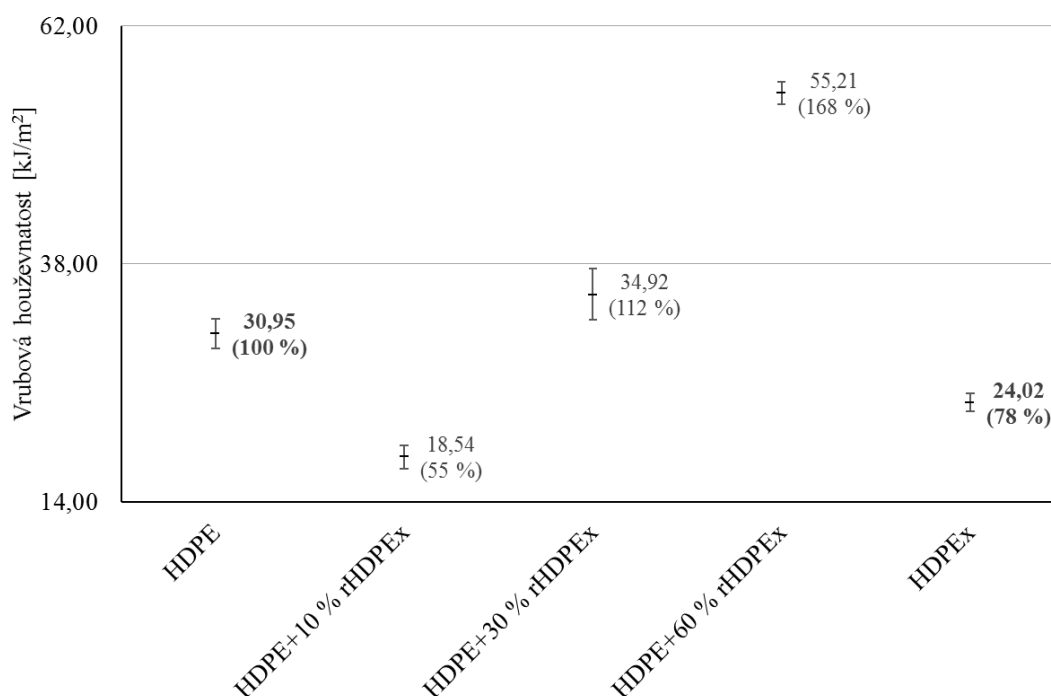
Obr. 4.41: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty

Z výsledků poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty je patrné, že u všech koncentrací zkoumané směsi došlo ke skokovému poklesu této veličiny oproti původnímu nemodifikovanému HDPE (viz. Obr. 4.41). Již u nejnižší koncentrace plnění došlo k dramatickému snížení až o 87 % oproti původnímu materiálu. Další zvyšování podílu použitého plniva nemělo na poměrné prodloužení v tahu žádný výrazný vliv.

**Maximální vrubová houževnatost  $A_M$** 

Tab. 4.39: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	30,95	18,54	34,92	55,21	24,02
Medián [kJ/m <sup>2</sup> ]	31,96	18,05	36,66	55,22	23,96
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,34	3,79	8,17	3,52	2,04
Nejistota typu A [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,49	1,20	2,58	1,11	0,91
Minimum [kJ/m <sup>2</sup> ]	27,49	13,40	21,89	51,04	20,88
Maximum [kJ/m <sup>2</sup> ]	35,02	27,21	46,02	60,45	26,00



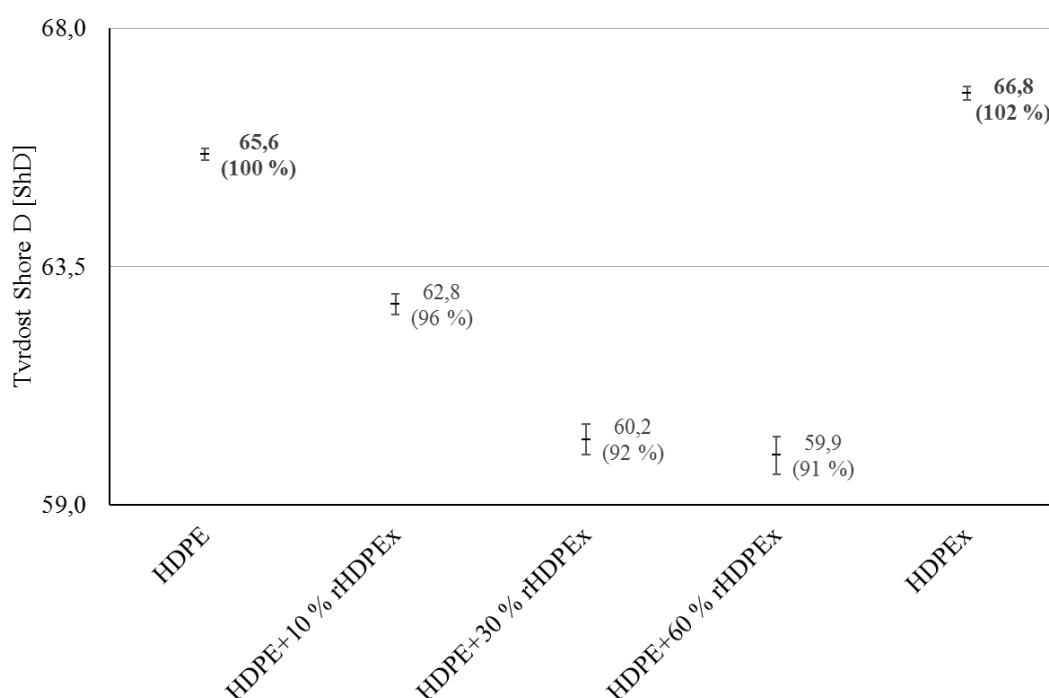
Obr. 4.42: Maximální vrubová houževnatost

Na Obr. 4.42 je zobrazena maximální vrubová houževnatost zkoumané směsi. U HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub> plniva došlo ke skokovému snížení z 30,95 kJ/m<sup>2</sup> na 17,13 kJ/m<sup>2</sup>. U dalších koncentrací se vrubová houževnatost naopak zvýšila oproti původnímu materiálu. Maximální hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena u HDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž vzrostla až na 51,85 kJ/m<sup>2</sup>.

**Tvrdość Shore D**

Tab. 4.40: Naměřená data tvrdosti Shore D

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [ShD]	65,6	62,8	60,2	59,9	66,8
Medián [ShD]	65,7	62,5	60,4	60,2	66,8
Směrodatná odchylka [ShD]	0,4	0,6	0,9	1,1	0,4
Nejistota typu A [ShD]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1
Minimum [ShD]	64,9	62,0	58,5	58,3	66,2
Maximum [ShD]	66,1	63,7	61,4	61,7	67,5



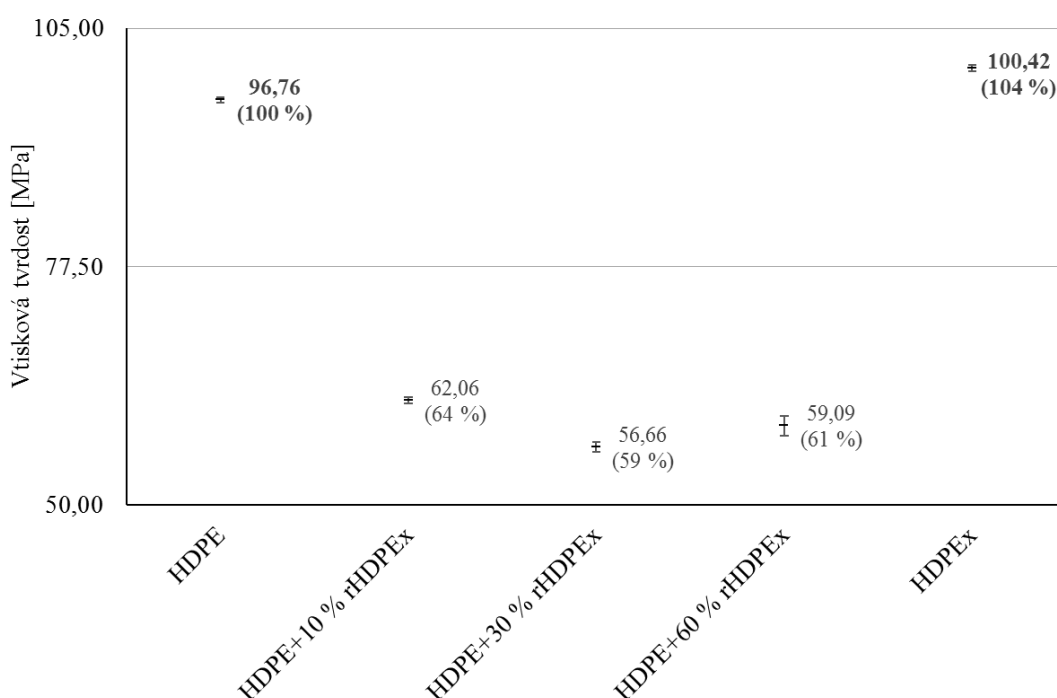
Obr. 4.43: Tvrdość Shore D

Vliv použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva na Shore D tvrdost je zobrazen na Obr. 4.43. Z naměřených hodnot je vidět klesající tendence s rostoucím podílem plniva. U prvních dvou koncentrací plnění byl zaznamenán plynulý pokles až o 8 % při porovnání s tvrdostí původního nemodifikovaného HDPE. Dalším zvýšením podílu plniva se tvrdost již prakticky nezměnila. Nejnižší hodnota tvrdosti byla zaznamenána u maximální koncentrace plnění. Celkově klesla tvrdost z 65,6 ShD na 59,9 ShD, což odpovídá rozdílu 9 %.

**Mikrotvrdość**

Tab. 4.41: Naměřená data vtiskové tvrdosti

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	96,76	62,06	56,66	59,09	100,42
Medián [MPa]	96,68	61,66	57,04	59,65	100,41
Směrodatná odchylka [MPa]	0,91	1,11	1,80	3,52	1,15
Nejistota typu A [MPa]	0,29	0,35	0,57	1,11	0,37
Minimum [MPa]	95,45	60,98	53,96	54,38	98,72
Maximum [MPa]	98,24	63,78	58,85	63,18	102,32

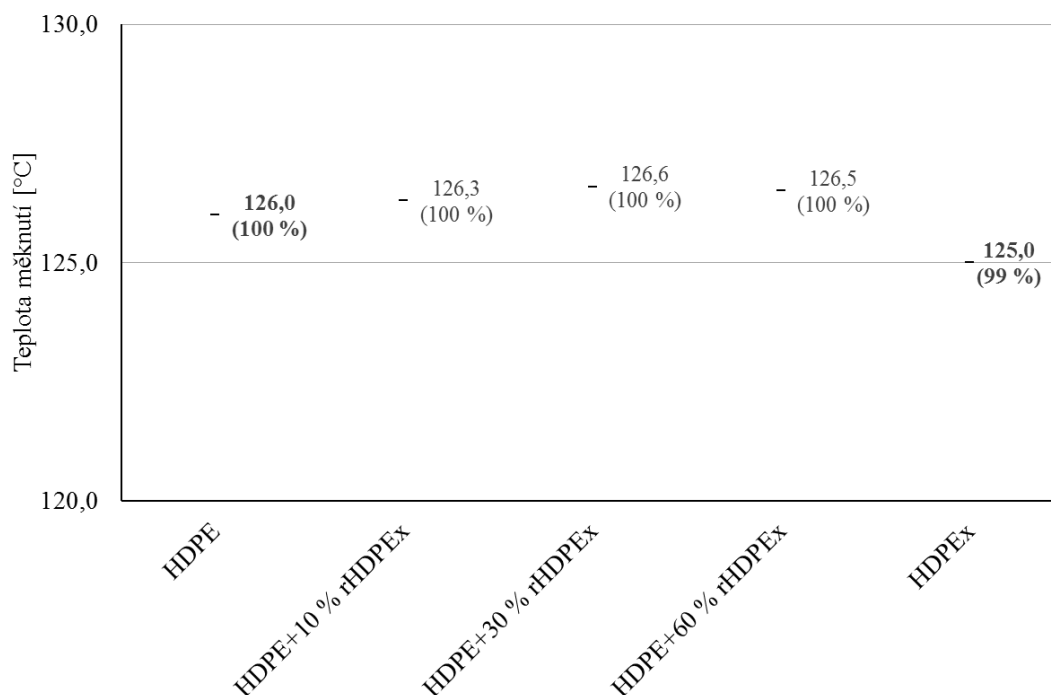


Obr. 4.44: Vtisková tvrdost

Mikrotvrdość reprezentovaná vtiskovou tvrdostí HIT je u všech koncentrací zkoumané směsi přibližně stejná (viz. Obr. 4.44). Nicméně při porovnání s původním nemodifikovaným HDPE je patrný výrazný pokles. Největší pokles byl naměřen u HDPE s 30 % rHDPE<sub>x</sub>, u něhož došlo k celkovému snížení o 41 % oproti původní hodnotě. V absolutních hodnotách to odpovídá propadu z 96,76 MPa na 56,66 MPa.

#### 4.4.2 Tepelné vlastnosti

##### *Teplota měknutí dle Vicata*



Obr. 4.45: Teplota měknutí

U teploty měknutí dle Vicata nedošlo k žádné výrazné změně a je tedy vidět velmi malý vliv použitého plniva (Obr. 4.45). Hodnota této veličiny se u všech měřených materiálů pohybovala kolem 126 °C.

#### 4.4.3 Zpracovatelské vlastnosti

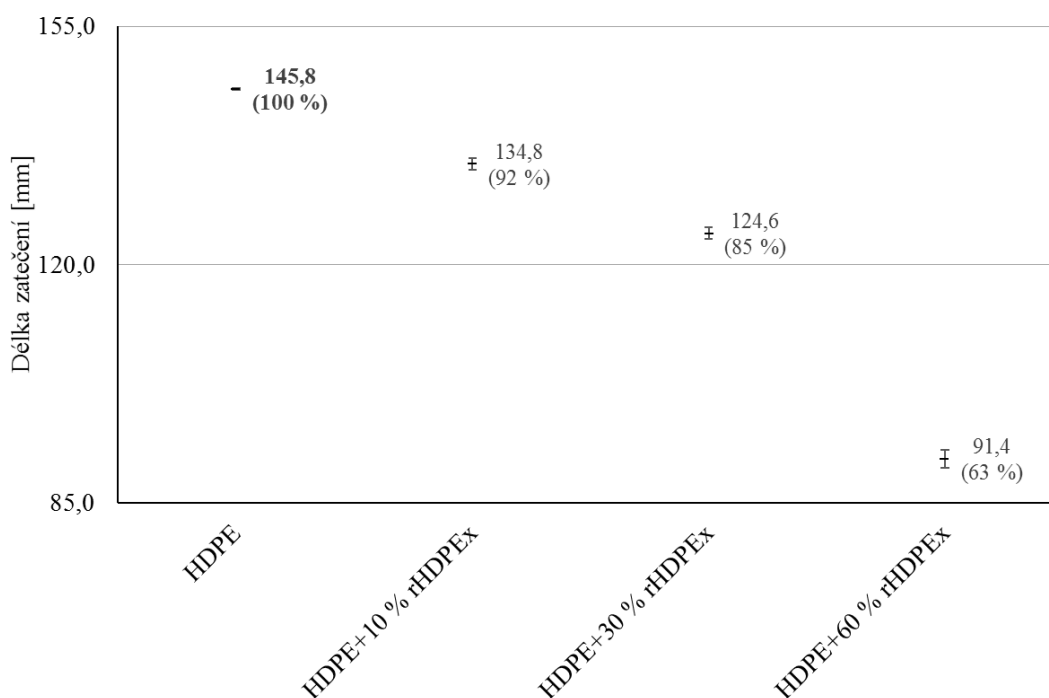
##### *Délka zatečení ve spirále*

Tab. 4.42: Naměřená data délky zatečení ve spirále

n = 10	HDPE	10 %	30 %	60 %
		rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [mm]	145,8	134,8	124,6	91,4
Medián [mm]	146,0	134,5	125,5	92,0
Směrodatná odchylka [mm]	0,4	2,9	2,7	4,3
Nejistota typu A [mm]	0,1	0,9	0,9	1,4
Minimum [mm]	145,0	130,0	120,0	84,0
Maximum [mm]	146,0	140,0	128,0	98,0

Porovnáním tokových vlastností je na Obr. 4.46 možné pozorovat sestupný trend. U nejnižší koncentrace plniva je délka zatečení menší o 9 % oproti původnímu nemodifikovanému HDPE, u dalších koncentrací je rozdíl ještě výraznější.

K největšímu poklesu došlo u HDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub> plniva, kdy se délka zatečení snížila z 145,8 mm na 91,4 mm, což odpovídá rozdílu 37 %.



Obr. 4.46: Délka zatečení ve spirále

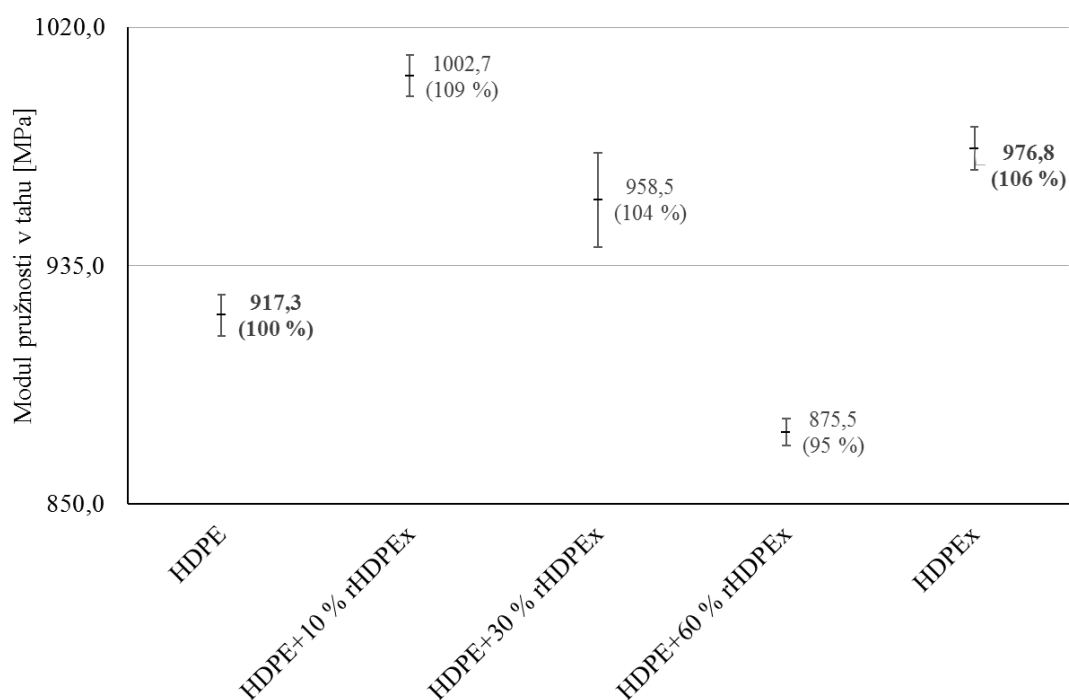
## 4.5 Směs E - granulát HDPE + prášek rHDPE<sub>x</sub>

### 4.5.1 Mechanické vlastnosti

#### Modul pružnosti v tahu $E$ za pokojové teploty

Tab. 4.43: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	917,3	1002,7	958,5	875,5	976,8
Medián [MPa]	918,0	1006,0	950,1	870,7	979,2
Směrodatná odchylka [MPa]	32,8	23,3	53,2	15,2	34,1
Nejistota typu A [MPa]	7,3	7,4	16,8	4,8	7,6
Minimum [MPa]	848,5	969,8	891,6	856,9	901,3
Maximum [MPa]	985,5	1035,0	1027,0	904,5	1021,7



Obr. 4.47: Modul pružnosti v tahu za pokojové teploty

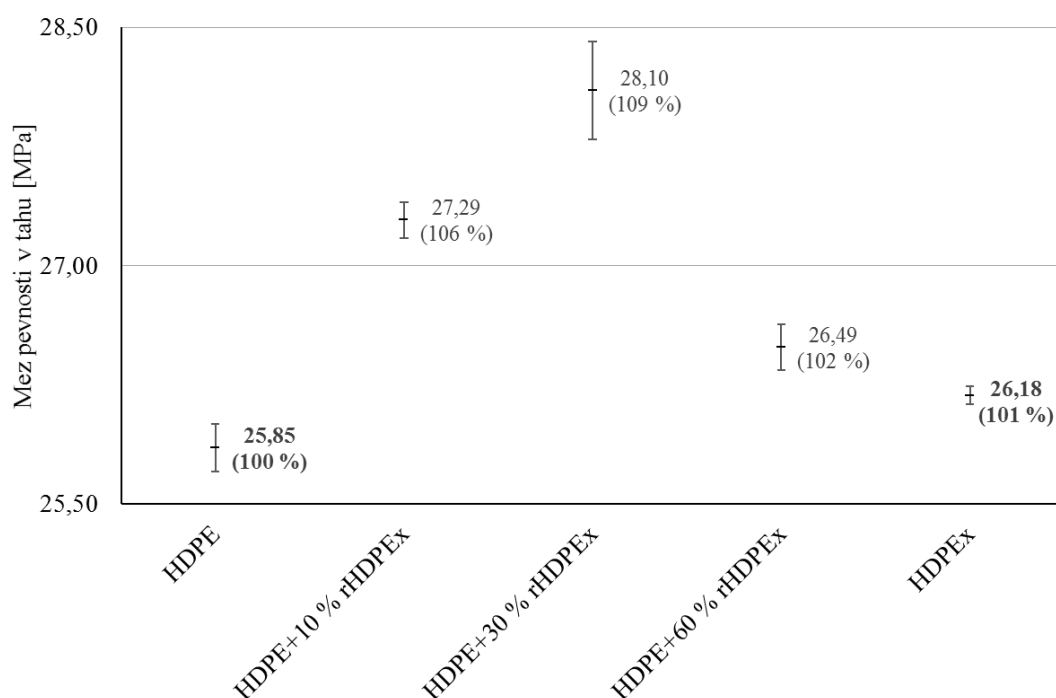
Z výsledků modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty je možné vidět, že u 10 a 30% koncentrace plnění došlo k nárůstu oproti původnímu nemoifikovanému HDPE. U 60% koncentrace rHDPE<sub>x</sub> plniva došlo naopak k poklesu oproti původní hodnotě (Obr. 4.47). Maximum bylo naměřeno u HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub>, u nějž došlo k nárůstu o 9 % z původních 917,3 MPa na 1002,7 MPa. Tato hodnota je dokonce vyšší než hodnota modulu pružnosti v tahu původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub>, u nějž bylo naměřeno 976,8 MPa.

#### **Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za pokojové teploty**

Tab. 4.44: Naměřená data meze pevnosti v tahu za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	25,85	27,29	28,10	26,49	26,18
Medián [MPa]	25,80	27,41	27,90	26,49	26,26
Směrodatná odchylka [MPa]	0,67	0,36	0,98	0,46	0,25
Nejistota typu A [MPa]	0,15	0,11	0,31	0,15	0,06
Minimum [MPa]	24,71	26,67	27,05	25,95	25,65
Maximum [MPa]	27,16	27,82	29,79	27,30	26,62





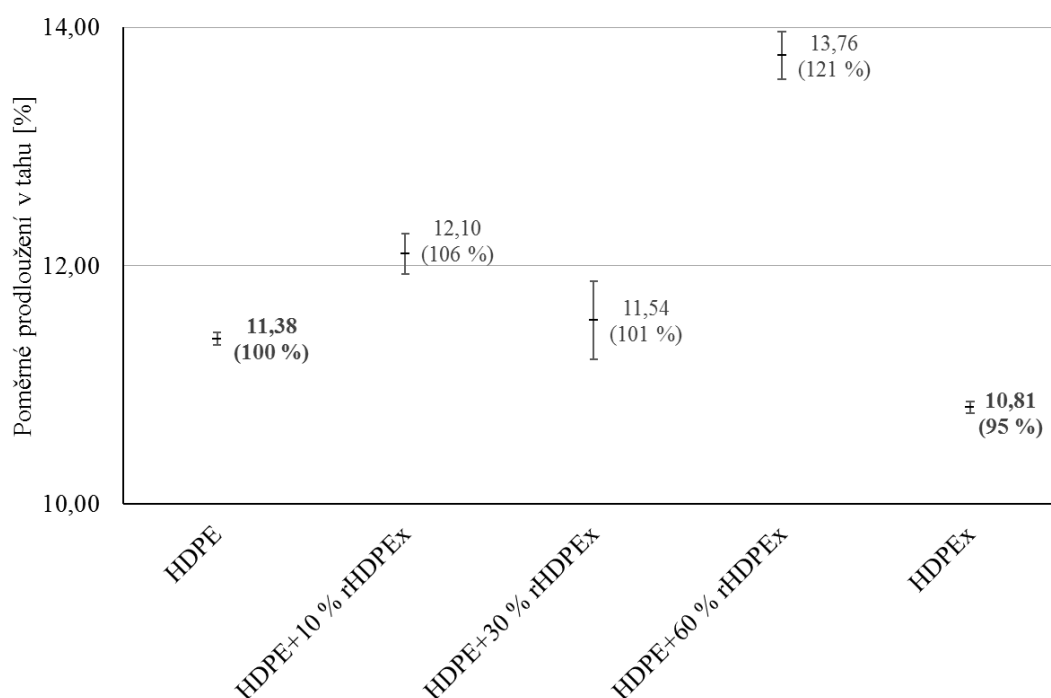
Obr. 4.48: Mez pevnosti v tahu za pokojové teploty

Porovnáním meze pevnosti v tahu za pokojové teploty lze pozorovat nárůst této veličiny u všech koncentrací plnění zkoumané směsi (viz. Obr. 4.48). Hodnoty meze pevnosti v tahu jsou vyšší jak v porovnání s původním nemodifikovaným HDPE, tak s původním modifikovaným HDPE<sub>x</sub>. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u HDPE s 30 % rHDPE<sub>x</sub>. U této koncentrace plnění vzrostla mez pevnosti v tahu z původních 25,85 MPa na 28,10 MPa, což odpovídá zvýšení o 9 %.

#### **Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za pokojové teploty**

Tab. 4.45: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	11,38	12,10	11,54	13,76	10,81
Medián [%]	11,35	12,17	11,55	13,62	10,84
Směrodatná odchylka [%]	0,24	0,54	1,03	0,63	0,22
Nejistota typu A [%]	0,05	0,17	0,33	0,20	0,05
Minimum [%]	11,04	10,99	10,05	12,91	10,34
Maximum [%]	12,02	13,07	12,89	14,74	11,14



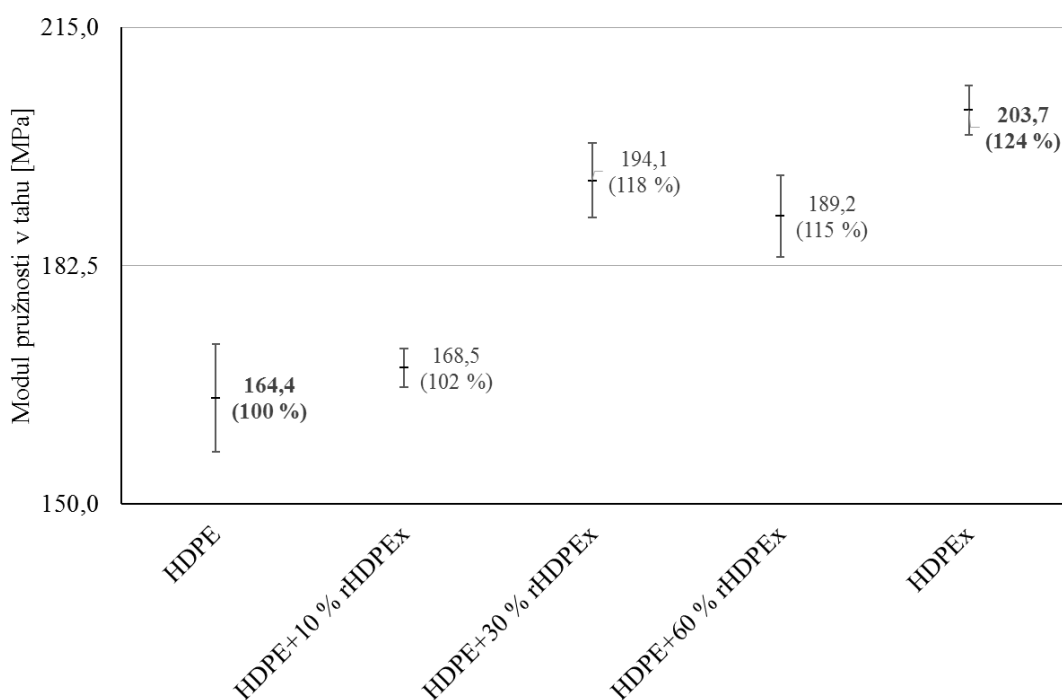
Obr. 4.49: Poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty

Při porovnání vlivu použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva na poměrné prodloužení v tahu za pokojové teploty lze na Obr. 4.49 vidět, že největší nárůst byl zaznamenán u nejvyšší koncentrace plnění. Velikost poměrného prodloužení v tahu se zvýšila z 11,38 % na 13,76 %, což odpovídá změně o 21 %. U ostatních koncentrací použitého plniva je nárůst v rámci jednotek procent. Porovnáním výsledků s původním modifikovaným HDPE<sub>x</sub> je možné konstatovat, že u všech měřených koncentrací plniva je velikost poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty vyšší.

#### **Modul pružnosti v tahu $E$ za zvýšené teploty**

Tab. 4.46: Naměřená data modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	164,4	168,5	194,1	189,2	203,7
Medián [MPa]	164,5	169,5	192,6	189,3	203,7
Směrodatná odchylka [MPa]	20,9	8,3	16,1	17,8	11,5
Nejistota typu A [MPa]	7,4	2,6	5,1	5,6	3,3
Minimum [MPa]	137,4	153,6	174,0	164,6	184,7
Maximum [MPa]	192,5	179,5	219,9	223,0	221,8



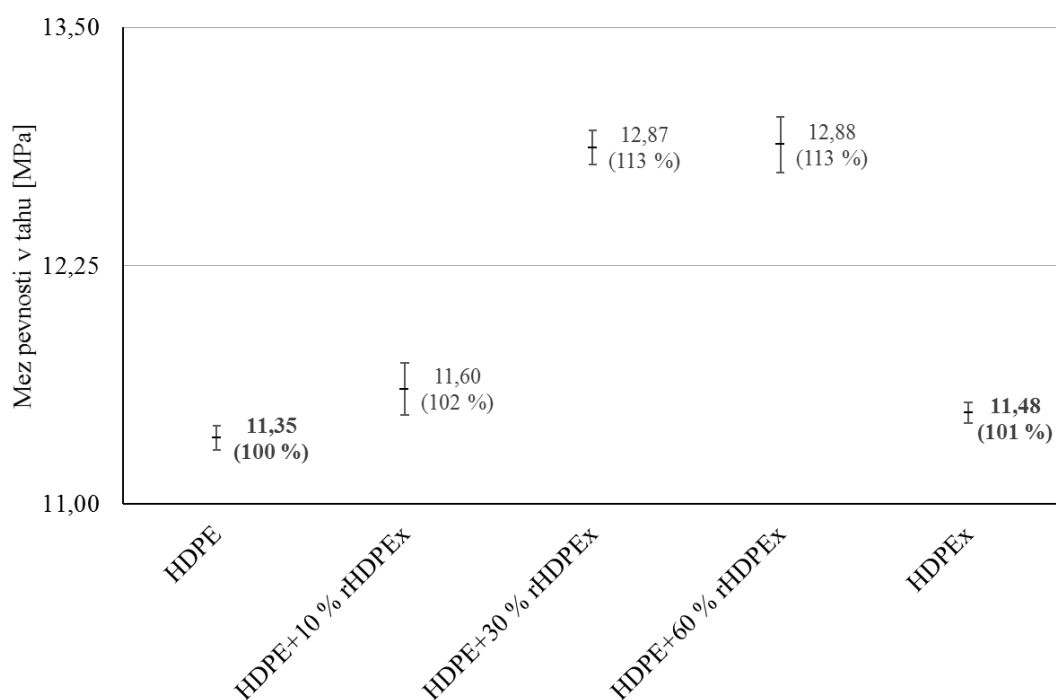
Obr. 4.50: Modul pružnosti v tahu za zvýšené teploty

Výsledky měření modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty jsou zobrazeny na Obr. 4.50. U nejnižší koncentrace plnění došlo pouze k malému zvýšení oproti původnímu nemodifikovanému HDPE. U vyšších koncentrací plnění je nárůst oproti původní hodnotě mnohem výraznější. Největší rozdíl byl naměřen u HDPE s 30 % rHDPE<sub>x</sub>, kde se modul pružnosti v tahu zvýšil z 164,4 MPa na 194,1 MPa. Velikosti modulu pružnosti v tahu původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub> nebylo dosaženo u žádné z koncentrací plníva.

#### **Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ za zvýšené teploty**

Tab. 4.47: Naměřená data meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	11,35	11,60	12,87	12,88	11,48
Medián [MPa]	11,41	11,58	12,89	12,98	11,52
Směrodatná odchylka [MPa]	0,23	0,44	0,29	0,46	0,19
Nejistota typu A [MPa]	0,06	0,14	0,09	0,15	0,05
Minimum [MPa]	11,00	10,98	12,44	11,77	10,96
Maximum [MPa]	11,71	12,23	13,43	13,29	11,68



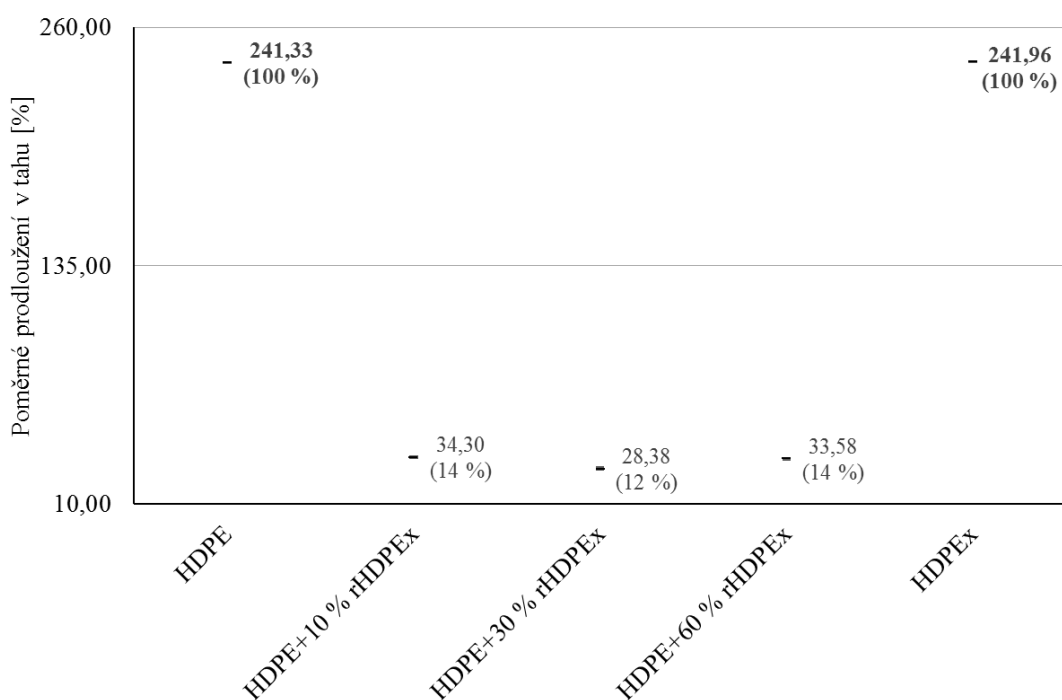
Obr. 4.51: Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty

Mez pevnosti v tahu za zvýšené teploty roste s rostoucím podílem rHDPE<sub>x</sub> plníva jak je vidět na Obr. 4.51. U nejnižší koncentrace došlo ke změně pouze o 2 % v porovnání s původním nemoifikovaným HDPE. U 30 a 60% koncentrace plnění je nárůst totožný. U obou je rozdíl mezi původní hodnotou 13 %, což odpovídá vzrůstu z 11,35 MPa na 12,87, resp. 12,88 MPa. Velikost meze pevnosti původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub> je nižší ve srovnání s jednotlivými koncentracemi zkoumané směsi.

#### **Poměrné prodloužení v tahu $\varepsilon_M$ za zvýšené teploty**

Tab. 4.48: Naměřená data poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [%]	241,33	34,30	28,38	33,58	241,96
Medián [%]	241,72	34,60	27,94	33,68	242,00
Směrodatná odchylka [%]	0,72	1,39	2,64	1,46	0,08
Nejistota typu A [%]	0,20	0,44	0,83	0,46	0,02
Minimum [%]	240,39	30,79	24,57	31,12	241,84
Maximum [%]	242,05	35,47	33,78	35,49	242,06



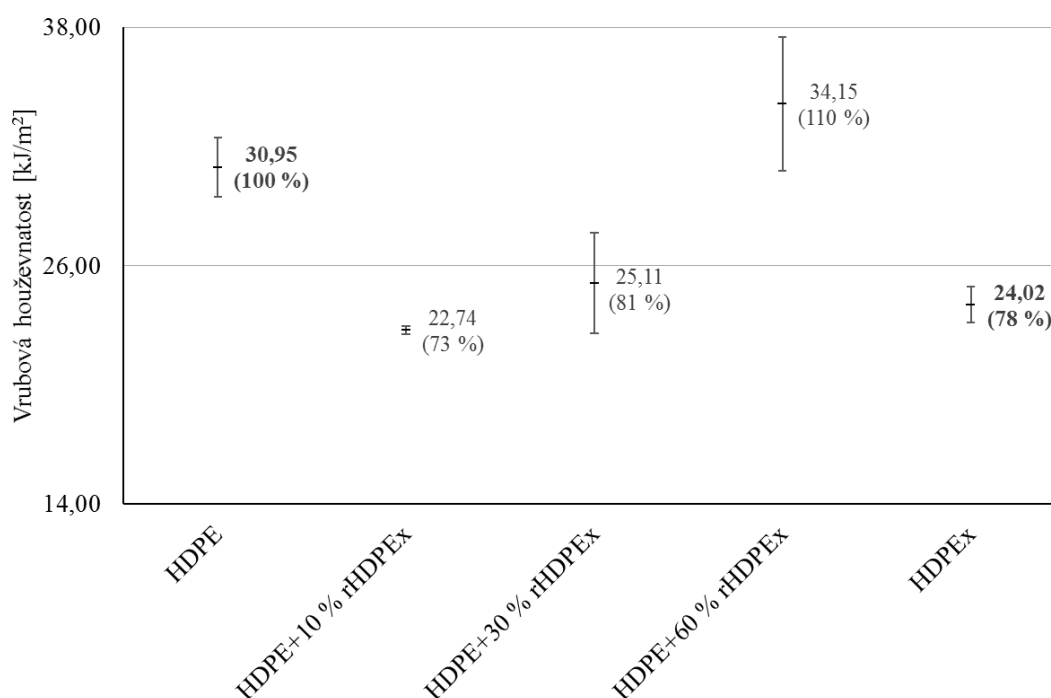
Obr. 4.52: Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty

U poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty došlo u všech koncentrací plnění k výraznému poklesu oproti původnímu nemodifikovanému HDPE (viz. Obr. 4.52). Již u nejnižší koncentrace plnění se poměrné prodloužení v tahu snížilo o 86 % oproti původnímu materiálu. Největší propad byl naměřen u 30% koncentrace plniva, u níž je rozdíl oproti původní hodnotě 88 %.

#### Maximální vrubová houževnatost $A_M$

Tab. 4.49: Naměřená data maximální vrubové houževnatosti

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	30,95	22,74	25,11	34,15	24,02
Medián [kJ/m <sup>2</sup> ]	31,96	22,75	22,97	35,74	23,96
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,34	0,44	5,67	7,57	2,04
Nejistota typu A [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,49	0,20	2,53	3,38	0,91
Minimum [kJ/m <sup>2</sup> ]	27,49	22,08	20,38	23,06	20,88
Maximum [kJ/m <sup>2</sup> ]	35,02	23,22	34,80	41,97	26,00



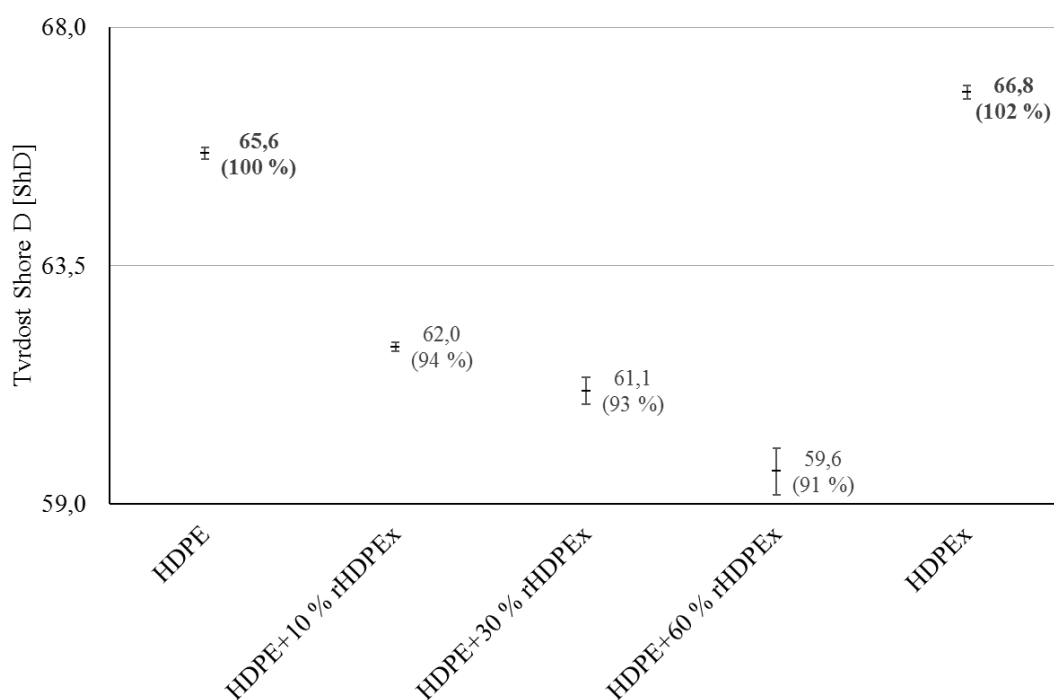
Obr. 4.53: Maximální vrubová houževnatost

Vliv použitého plniva na vrubovou houževnatost je zobrazen na Obr. 4.53. Z výsledků je patrné, že u HDPE s 10 a 30 % použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva došlo k poklesu vzhledem k původnímu nemodifikovanému HDPE. Největší pokles byl naměřen u 10% koncentrace plnění, kdy klesla vrubová houževnatost z původních 30,95 kJ/m<sup>2</sup> na 22,74 kJ/m<sup>2</sup>. U HDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub> došlo naopak k nárůstu oproti původnímu materiálu. Maximální vrubová houževnatost u něj vzrostla na 34,15 kJ/m<sup>2</sup>, což odpovídá zvýšení o 10 % oproti původní hodnotě.

### Tvrdość Shore D

Tab. 4.50: Naměřená data tvrdosti Shore D

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [ShD]	65,6	62,0	61,1	59,6	66,8
Medián [ShD]	65,7	61,9	61,4	60,0	66,8
Směrodatná odchylka [ShD]	0,4	0,3	0,8	1,4	0,4
Nejistota typu A [ShD]	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1
Minimum [ShD]	64,9	61,6	59,5	57,5	66,2
Maximum [ShD]	66,1	62,4	62,1	61,6	67,5



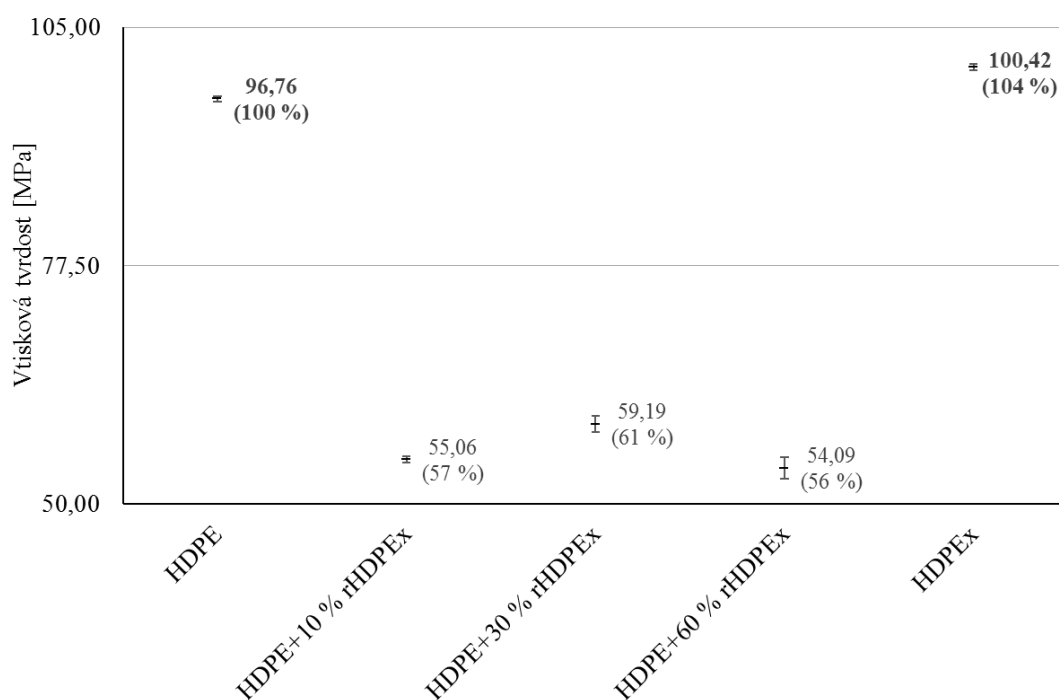
Obr. 4.54: Tvrdost Shore D

Dle výsledků Shore D tvrdosti je možné konstatovat, že s rostoucím obsahem použitého plniva dochází k poklesu tvrdosti, jak je znázorněno na Obr. 4.54. Naměřená tvrdost klesla z původních 65,6 ShD až na 59,6 ShD u HDPE s 60 % rHDPE<sub>x</sub>, což odpovídá snížení o 9 %. U koncentrace 10 a 30 % je pokles mírnější a odpovídá změně o 6, resp. 7 %. Velikost Shore D tvrdosti původního modifikovaného HDPE<sub>x</sub> je vyšší v porovnání s jednotlivými koncentracemi plnění.

### Mikrotvrdost

Tab. 4.51: Naměřená data vtiskové tvrdosti

n = 10	HDPE	10 % rHDPE <sub>x</sub>	30 % rHDPE <sub>x</sub>	60 % rHDPE <sub>x</sub>	HDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [MPa]	96,76	55,06	59,19	54,09	100,42
Medián [MPa]	96,68	55,52	58,57	53,44	100,41
Směrodatná odchylka [MPa]	0,91	1,13	2,97	3,89	1,15
Nejistota typu A [MPa]	0,29	0,36	0,94	1,23	0,37
Minimum [MPa]	95,45	53,16	56,19	48,76	98,72
Maximum [MPa]	98,24	56,48	66,41	61,49	102,32



Obr. 4.55: Vtisková tvrdost

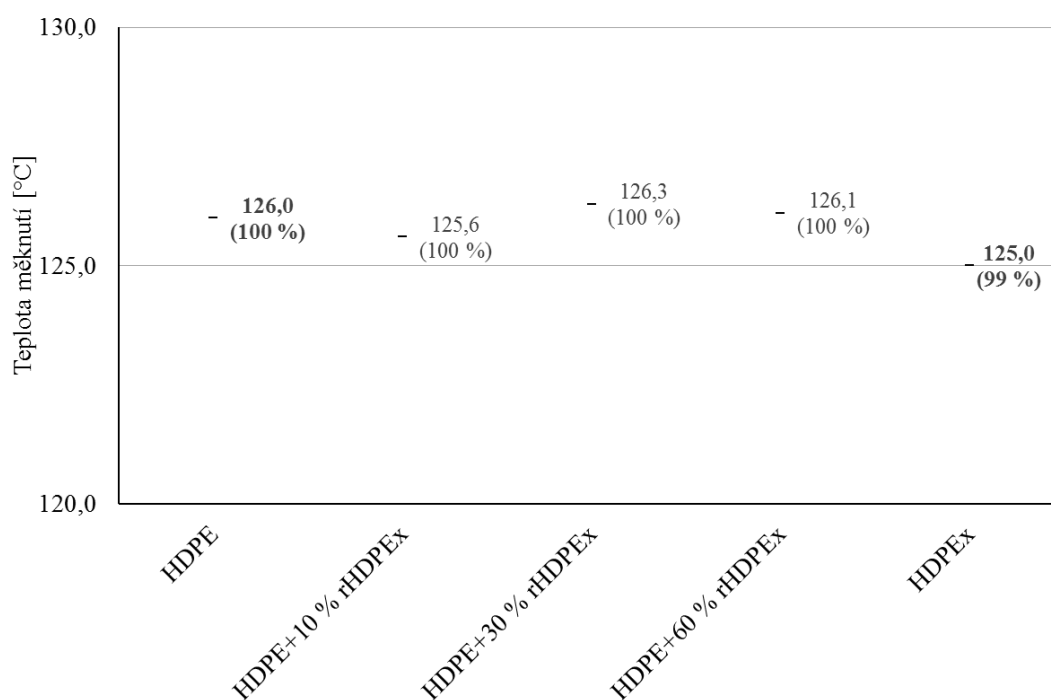
Porovnáním mikrotvrdosti je možné vidět skokový pokles u všech koncentrací použitého rHDPE<sub>x</sub> plniva oproti původnímu nemodifikovanému HDPE (Obr. 4.55). Již u HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub> klesla vtisková tvrdost o 43 %. U dalších koncentrací je pokles srovnatelný. Minimální hodnota byla naměřena u maximální koncentrace plnění, u níž klesla vtisková tvrdost z původních 96,76 MPa na 54,09 MPa.

## 4.5.2 Tepelné vlastnosti

### *Teplota měknutí dle Vicata*

Na Obr. 4.56 jsou zobrazeny výsledky měření teploty měknutí zkoumaných materiálů. Z výsledků je patrné, že teplota měknutí dle Vicata se u žádné z koncentrací dané směsi prakticky neliší od hodnot původního nemodifikovaného i modifikovaného HDPE, resp. HDPE<sub>x</sub>.





Obr. 4.56: Teplota měknutí

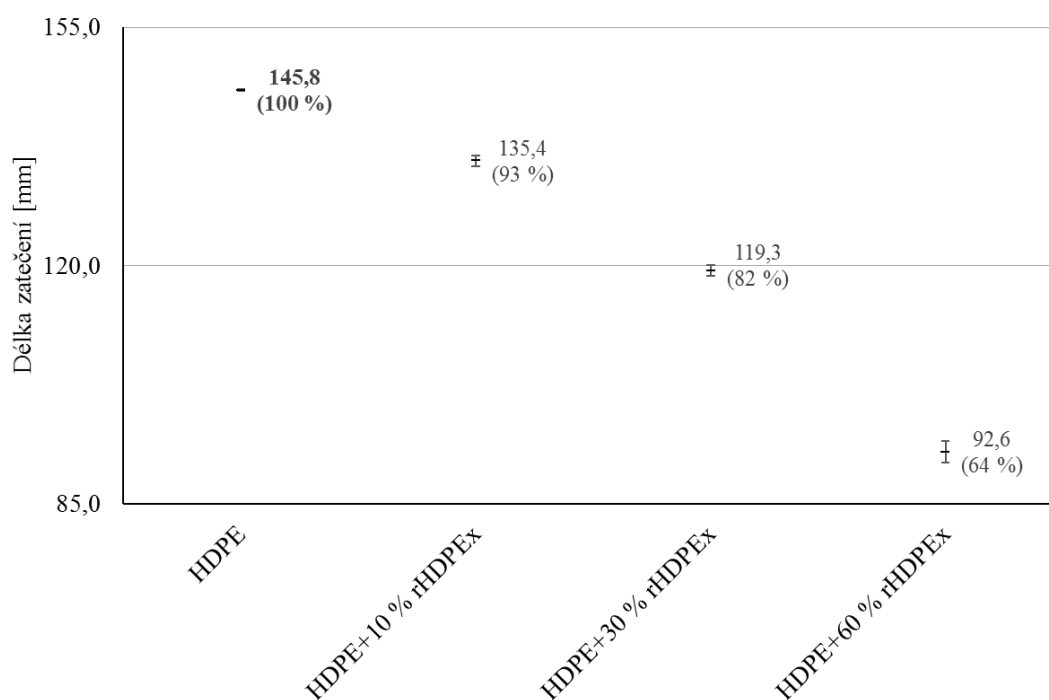
### 4.5.3 Zpracovatelské vlastnosti

#### *Délka zatečení ve spirále*

Tab. 4.52: Naměřená data délky zatečení ve spirále

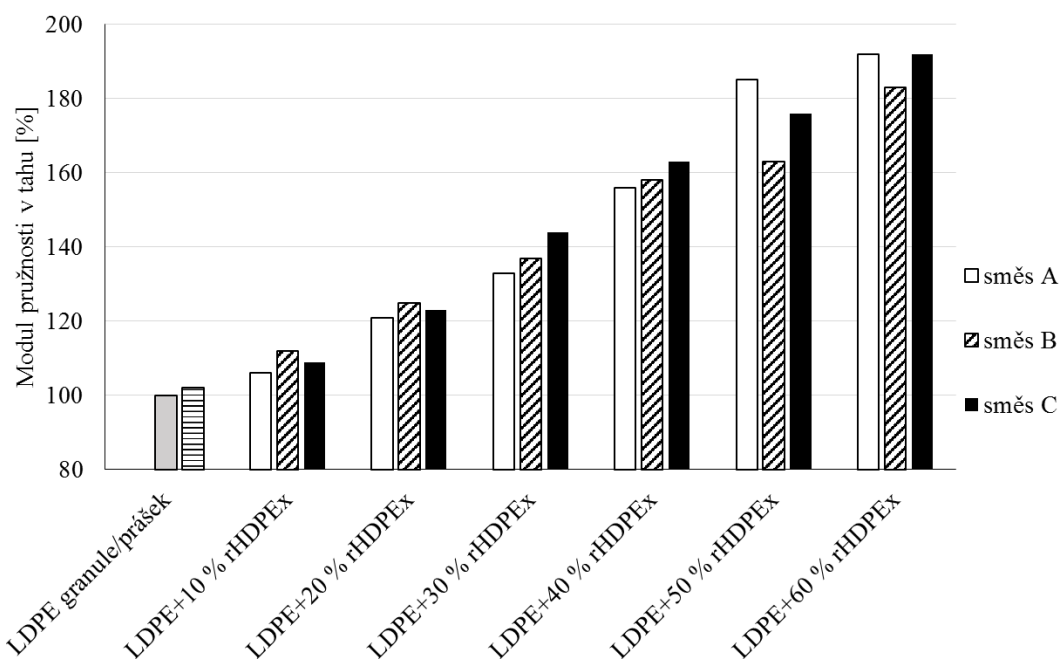
n = 10	HDPE	10 %	30 %	60 %
		rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>	rHDPE <sub>x</sub>
Aritmetický průměr [mm]	145,8	135,4	119,3	92,6
Medián [mm]	146,0	136,0	119,5	93,5
Směrodatná odchylka [mm]	0,4	2,4	2,6	5,0
Nejistota typu A [mm]	0,1	0,8	0,8	1,6
Minimum [mm]	145,0	131,0	116,0	84,0
Maximum [mm]	146,0	139,0	123,0	99,0

Na Obr. 4.57 je znázorněna délka zatečení charakterizující zpracovatelské vlastnosti. Při porovnání získaných hodnot je vidět sestupný trend s rostoucím podílem použitého plniva. U HDPE s 10 % rHDPE<sub>x</sub> plniva klesla délka zatečení z 145,8 mm na 135,4 mm. Největší pokles byl naměřen u maximální koncentrace plnění, u níž klesla délka zatečení až na 92,6 mm, což je změna o 36 % oproti původnímu nemodifikovanému HDPE.



Obr. 4.57: Délka zatečení ve spirále

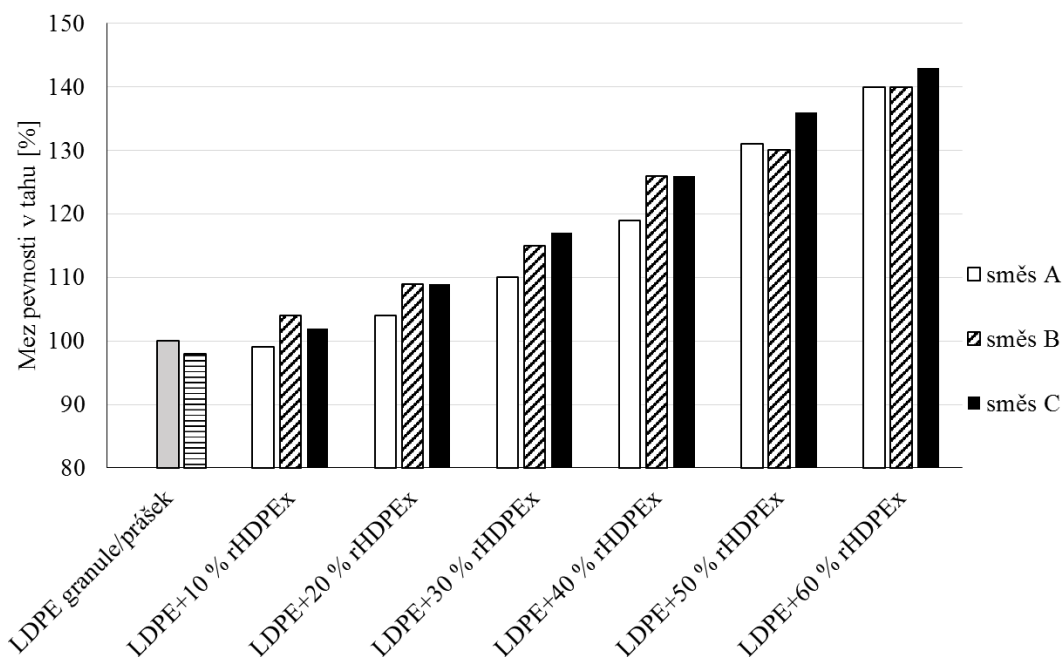
#### 4.6 Diskuze výsledků směsí A-C



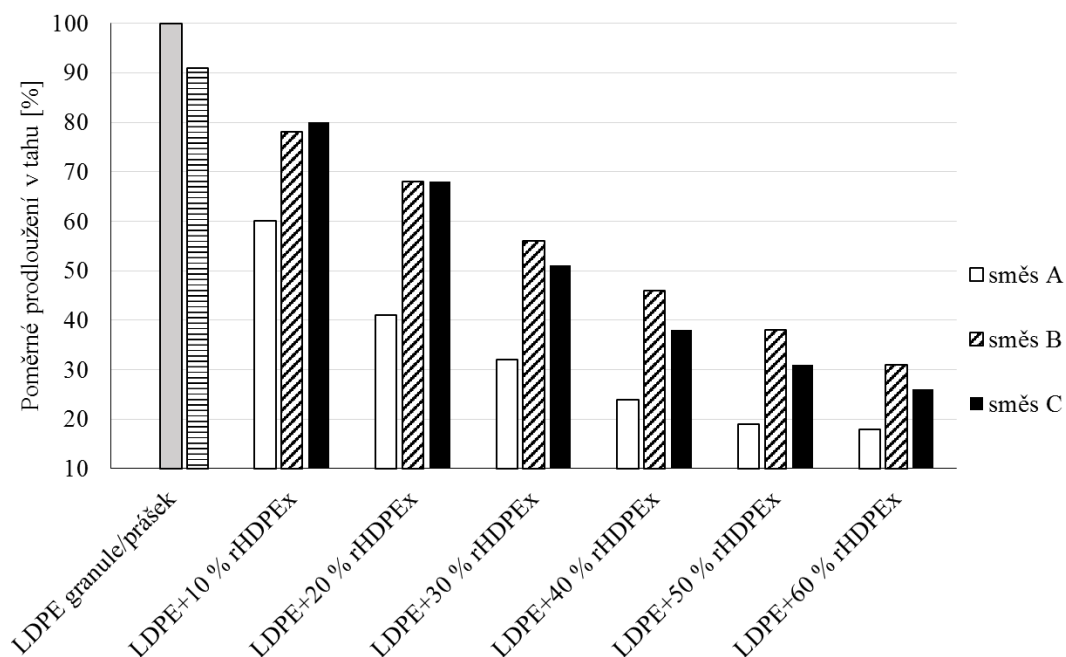
Obr. 4.58: Srovnání modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

Vzájemným porovnáním všech tří směsí s LDPE matricí (směsí A-C) lze pozorovat, že za pokojové teploty dochází k výraznému nárůstu jak modulu pružnosti v tahu, tak meze pevnosti v tahu (Obr. 4.58 a 4.59). Rozdíly mezi jednotlivými směsmi jsou minimální bez ohledu na výchozí formu obou složek směsi. Navýšení tuhosti i pevnosti koreluje s výrazným poklesem poměrného prodloužení v tahu (Obr. 4.60). S rostoucím podílem plniva se tedy všechny směsi stávají

tužší a pevnější, ale zároveň ztrácí svou houževnatost. Porovnáním poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty (Obr. 4.60) lze také pozorovat, že u směsi A, kde plnivo bylo ve formě drti, dochází k mnohem výraznějšímu poklesu, než u směsí s plnivem ve formě prášku (směsi B a C). To je pravděpodobně způsobeno vyšší citlivostí poměrného prodloužení na vzájemnou adhezi obou složek směsi. Adheze tedy může být nižší vlivem menšího měrného povrchu částic drti oproti práškové formě plniva a z toho plynoucí menší styčné ploše mezi plnivem a maticí. Velikost a tvar plniva mají na vzájemnou soudržnost významný vliv [62-66].

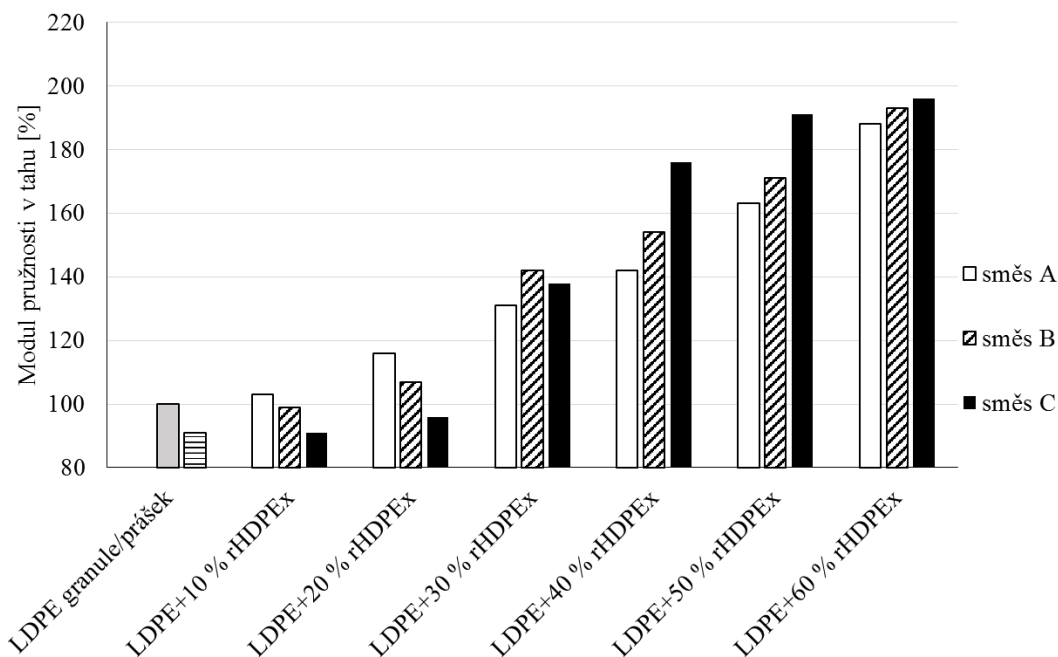


Obr. 4.59: Srovnání meze pevnosti v tahu za pokojové teploty



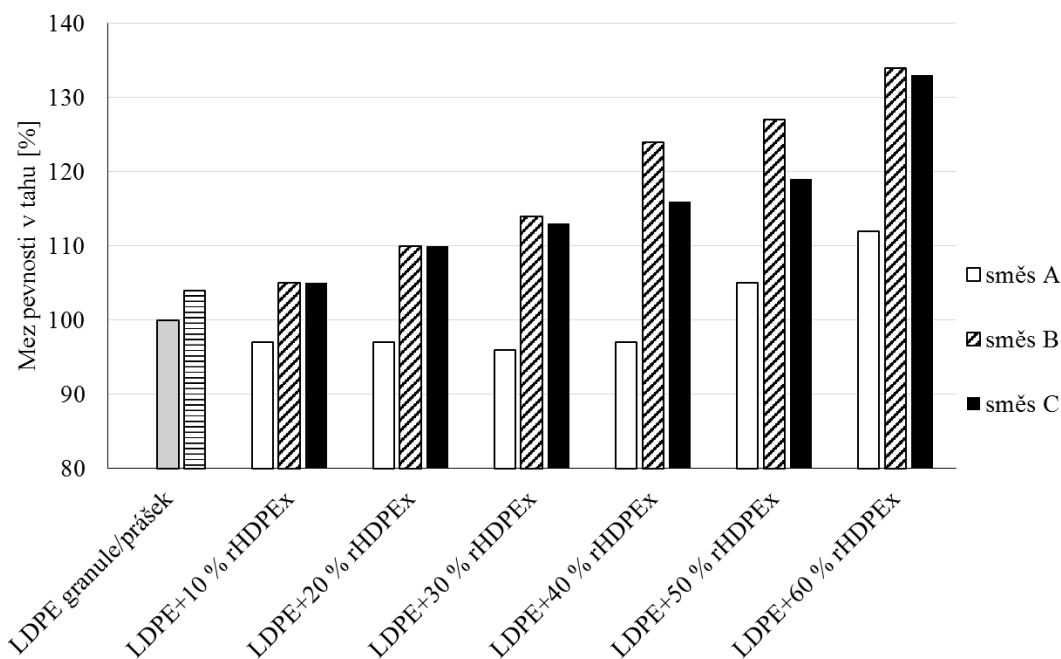
Obr. 4.60: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

Tahové vlastnosti směsí za zvýšené teploty vykazují podobné chování jako za teploty pokojové. Modul pružnosti v tahu vzrostl u všech tří směsí, stejně jako v předchozím případě, na téměř dvojnásobek své původní hodnoty (Obr. 4.61).



Obr. 4.61: Srovnání modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty

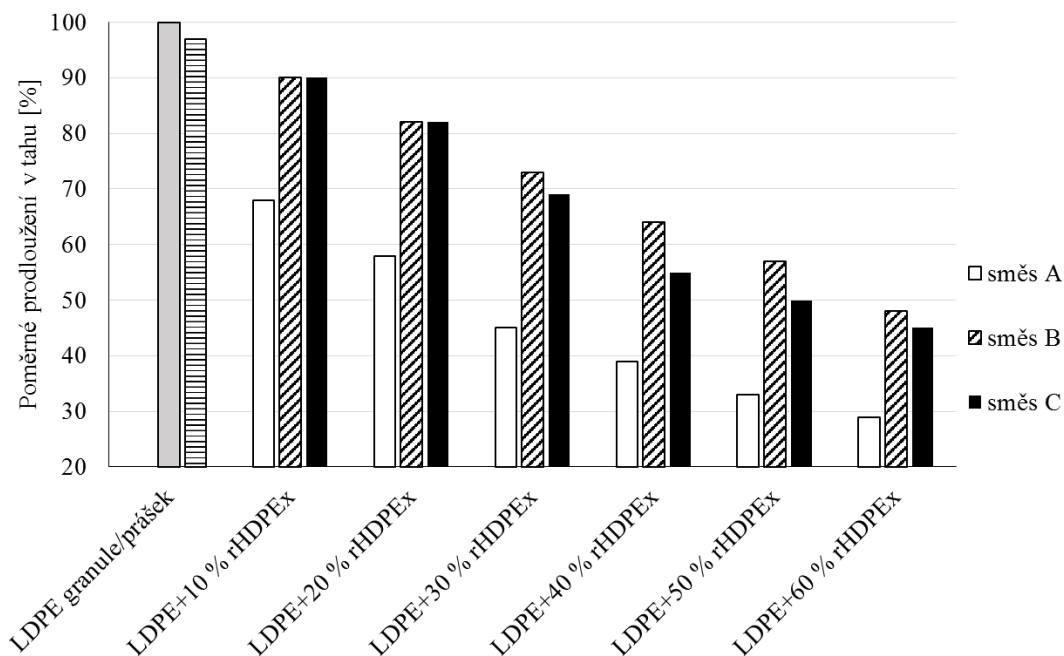
U meze pevnosti v tahu se projevily výrazné rozdíly mezi směsí s práškovou formou plniva a směsí s plnivem ve formě drti (Obr. 4.62). U směsí B a C, které mají plnivo ve formě prášku, dochází k pozvolnému nárůstu meze pevnosti v tahu již od nejnižších koncentrací. U směsi A dochází u nižších koncentrací nejdříve k jejímu mírnému poklesu a teprve až u vyšších koncentrací plniva k nárůstu.



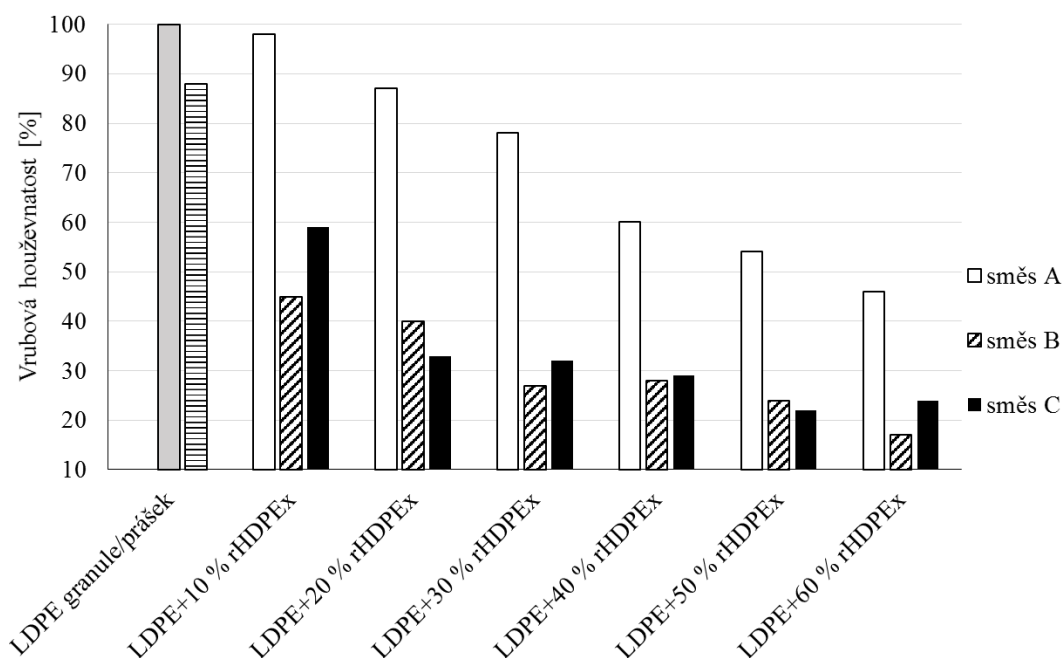
Obr. 4.62: Srovnání meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

Tento jev by mohl být opět způsobeno vlivem snížené vzájemné soudržnosti plniva a matrice u směsi A.

Poměrné prodloužení v tahu za zvýšené teploty má přibližně stejný průběh jako za pokojové teploty (Obr. 4.63). I za zvýšené teploty byl pozorován výrazný rozdíl v poklesu mezi směsí A a směsmi B a C.



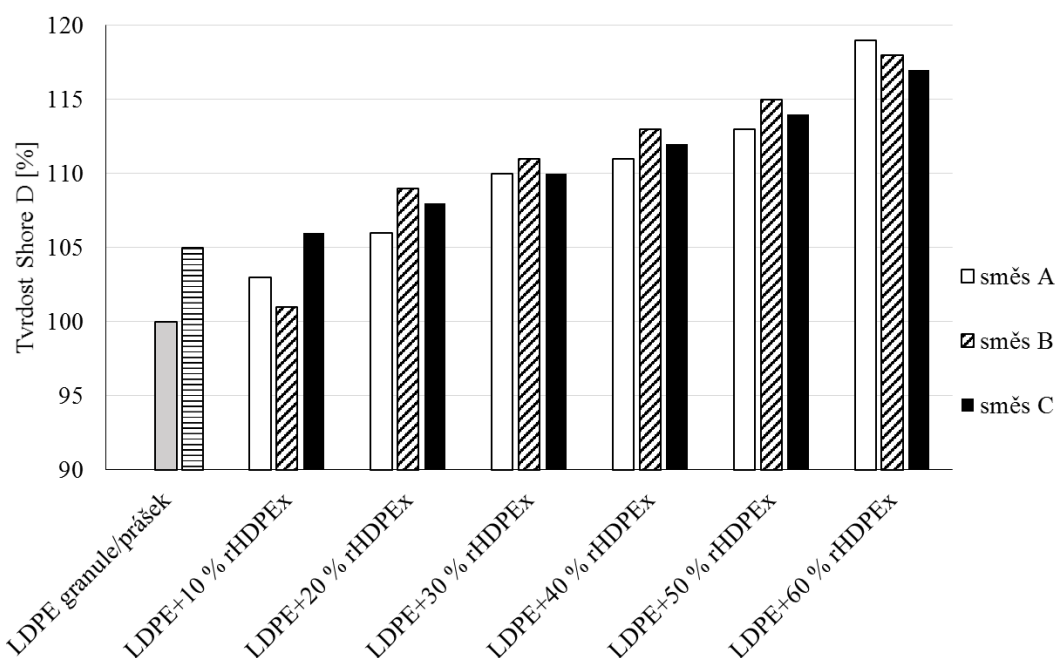
Obr. 4.63: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty



Obr. 4.64: Srovnání vrubové houževnatosti

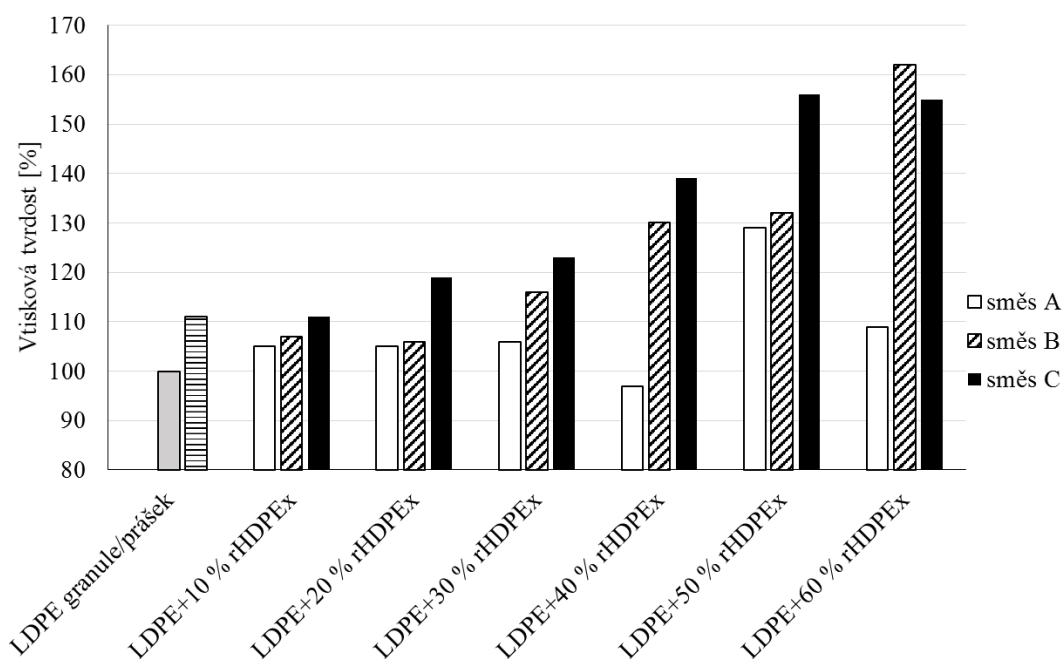
Zkouškou vrubové houževnatosti byly potvrzeny výsledky z tahové zkoušky. Z porovnání na Obr. 4.64 je vidět, že houževnatost klesá s rostoucím podílem plniva. U směsi A je pokles pozvolný, na rozdíl od směsí B a C, u nichž došlo ke

skokovému snížení již u nejnižší koncentrace. Z tohoto výsledku je patrný vliv distribuce částic plniva na výsledné vlastnosti. Je možné, že pozvolnější pokles u směsi A by mohl být způsoben nedokonalou distribucí částic drti po celém objemu zkušebního tělíska.



Obr. 4.65: Srovnání tvrdosti

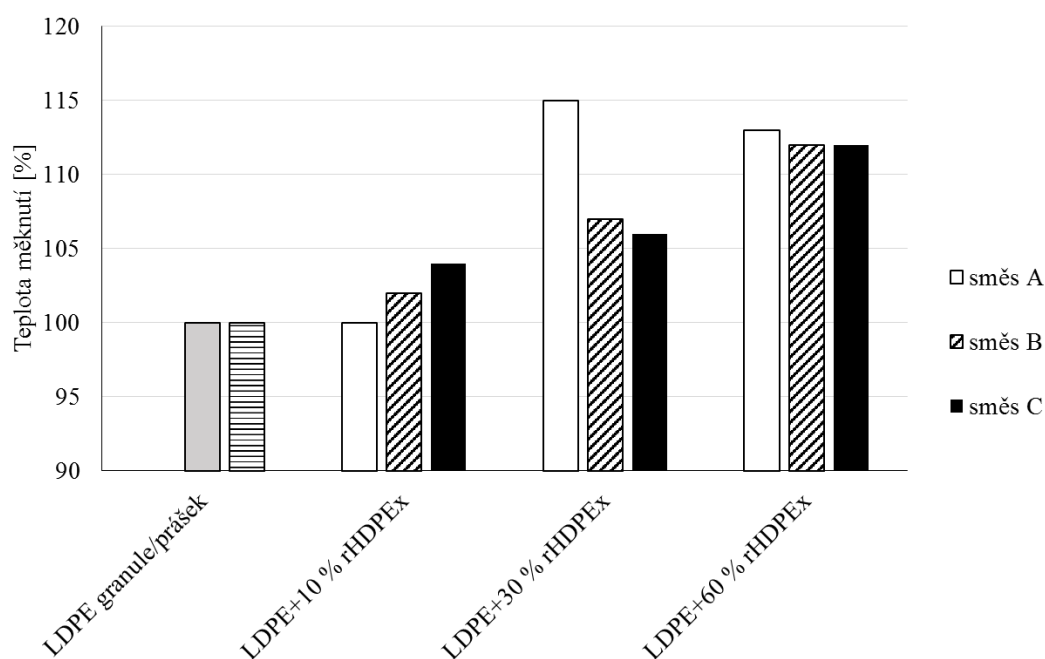
Porovnáním tvrdosti směsí A-C lze vidět rostoucí tendenci s rostoucím podílem plniva (Obr. 4.65). Z výsledků je také patrné, že vliv velikosti a tvaru částic je zanedbatelný a tvrdost všech tří směsí je u všech koncentrací plně srovnatelná.



Obr. 4.66: Srovnání mikrotvrdosti

Z hlediska mikrotvrlosti je situace odlišná (Obr. 4.66). U směsi A je ovlivnění tenké povrchové vrstvy mnohem menší než u směsí B a C, a proto je u ní nárůst mikrotvrlosti výrazně nižší. Příčinou tohoto jevu by mohla být opět rovnoměrnější distribuce práškové formy plniva po celém objemu zkušebního tělíska.

Z výsledků zkoušek mechanických vlastností vyplývá, že s rostoucím podílem použitého plniva dochází k výraznému nárůstu tuhosti, pevnosti a tvrdosti, ale na druhou stranu k poklesu houževnatosti a materiál se tak stává křehčím. Lze tedy konstatovat, že z hlediska mechanického chování se jednotlivé směsi s rostoucím podílem plniva přibližují do jisté míry svými vlastnostmi vlastnostem použitého plniva. Tento efekt je pozorován bez ohledu na výchozí formu obou složek směsi.



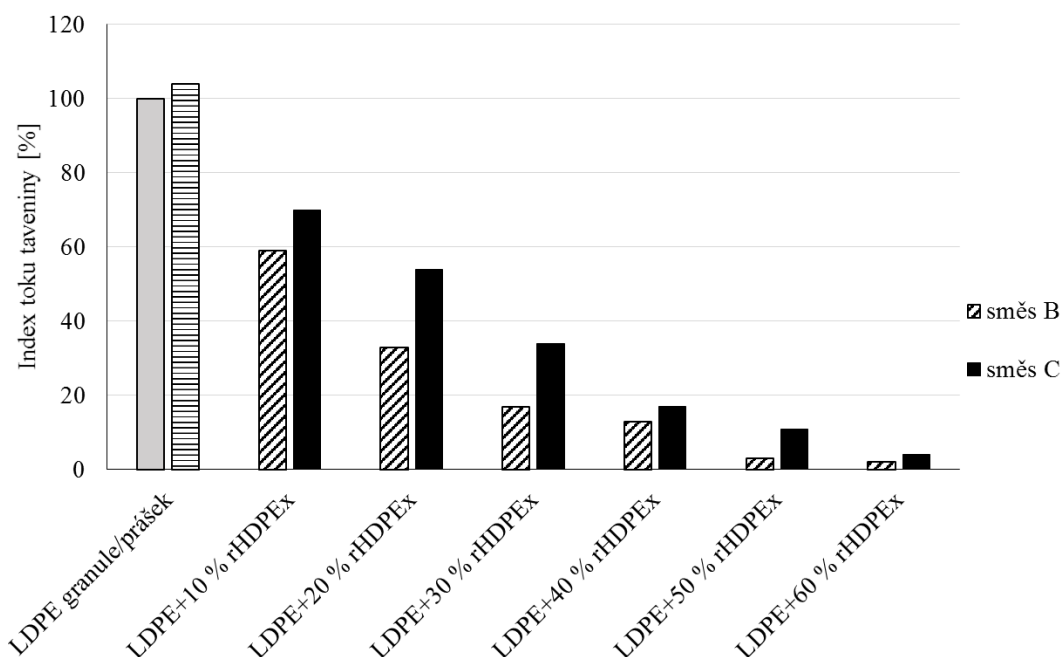
Obr. 4.67: Srovnání teploty měknutí

Pozitivní vliv plniva byl zaznamenán i v případě tepelných vlastností směsí (Obr. 4.67). U všech tří směsí došlo k nárůstu teploty měknutí až o 15 %.

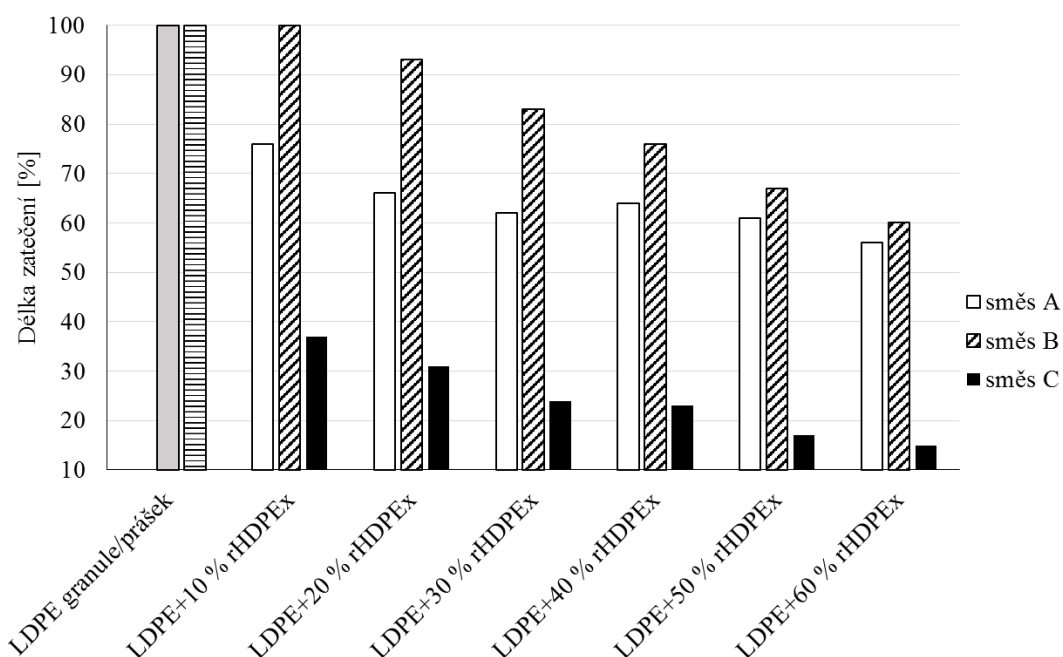
Porovnáním tokového chování pomocí indexu toku taveniny (Obr. 4.68) je vidět, že u směsí B i C dochází k jeho výraznému zhoršení s rostoucí dávkou plnění. U směsi A nebylo možné index toku taveniny změřit z důvodu relativně velké velikosti částic plniva, které nešlo protlačit přes definovanou kapiláru.

Zatékavost měřena na Archimédově spirále ukazuje poměrně velké rozdíly mezi jednotlivými směsmi (Obr. 4.69). Největší propad délky zatečení byl zaznamenán u směsi C, u níž je matrice i plnivo ve formě prášku. Tento pokles pravděpodobně souvisí s obtížnou plastikací práškového materiálu plastikační jednotkou vstřikovacího stroje, který není pro tyto účely příliš vhodný. Rozdíl mezi směsí A a B je u nižších koncentrací plnění pravděpodobně způsoben větší velikostí částic drti, které nebylo možné protlačit relativně malým průřezem kanálu spirály. S rostoucím podílem plniva se vzájemný rozdíl zmenšuje.

Použití netavitelného plniva tedy velmi výrazně přispívá ke zhoršení tokových vlastností, nicméně velmi také záleží na geometrii tokových kanálů, resp. dutiny a na použitých procesních parametrech.



Obr. 4.68: Srovnání indexu toku taveniny



Obr. 4.69: Srovnání zatékavosti

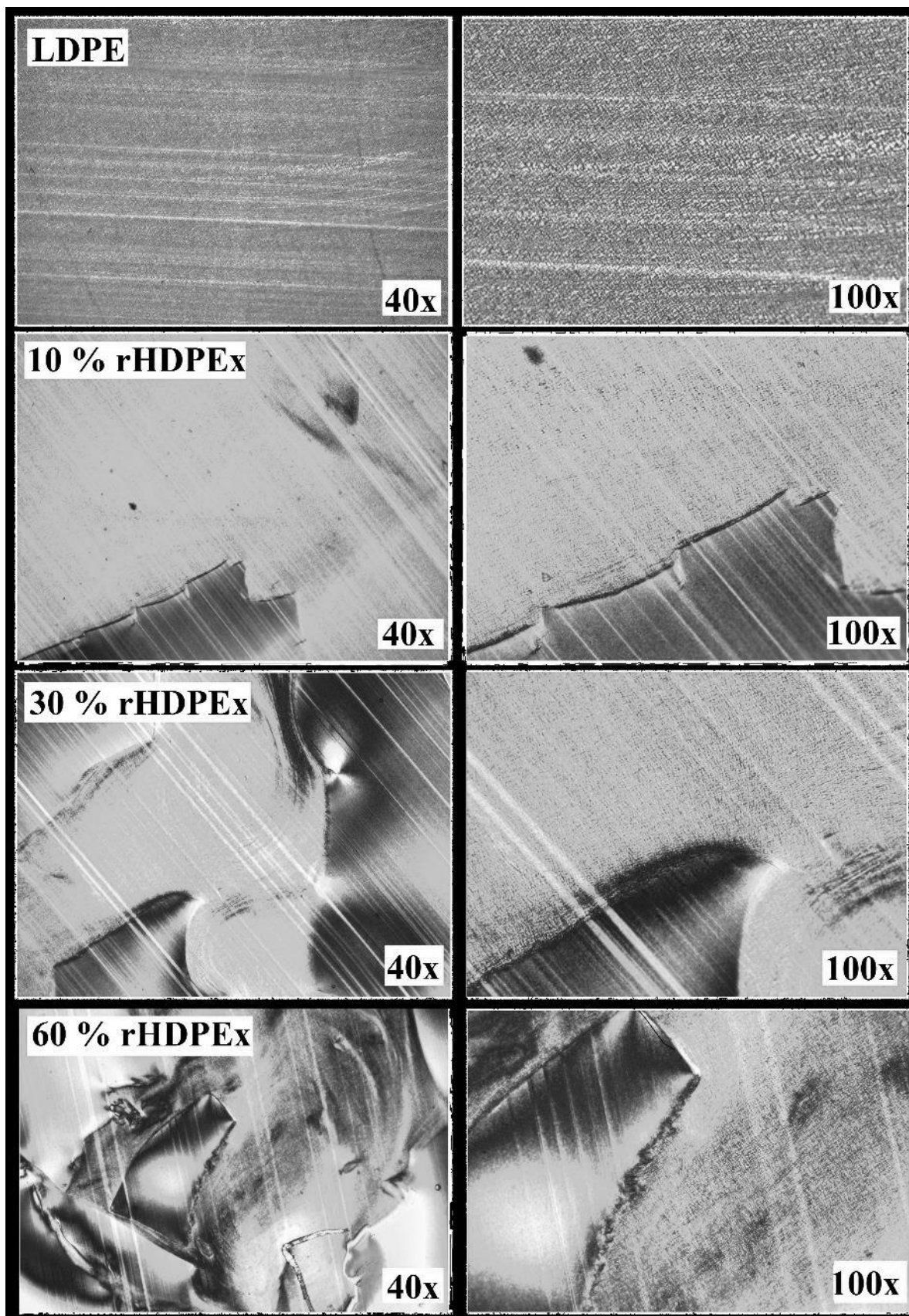
Hlavním předpokladem nárůstu mechanických vlastností je u směsí to, že materiál s horšími vlastnostmi je plněn materiálem s vlastnostmi lepšími. Tento předpoklad je v případě směsí A-C bez výhrad splněn, což ale samo o sobě nestačí. Mnohem důležitější aspektem je vzájemná kompatibilita, resp. soudržnost obou



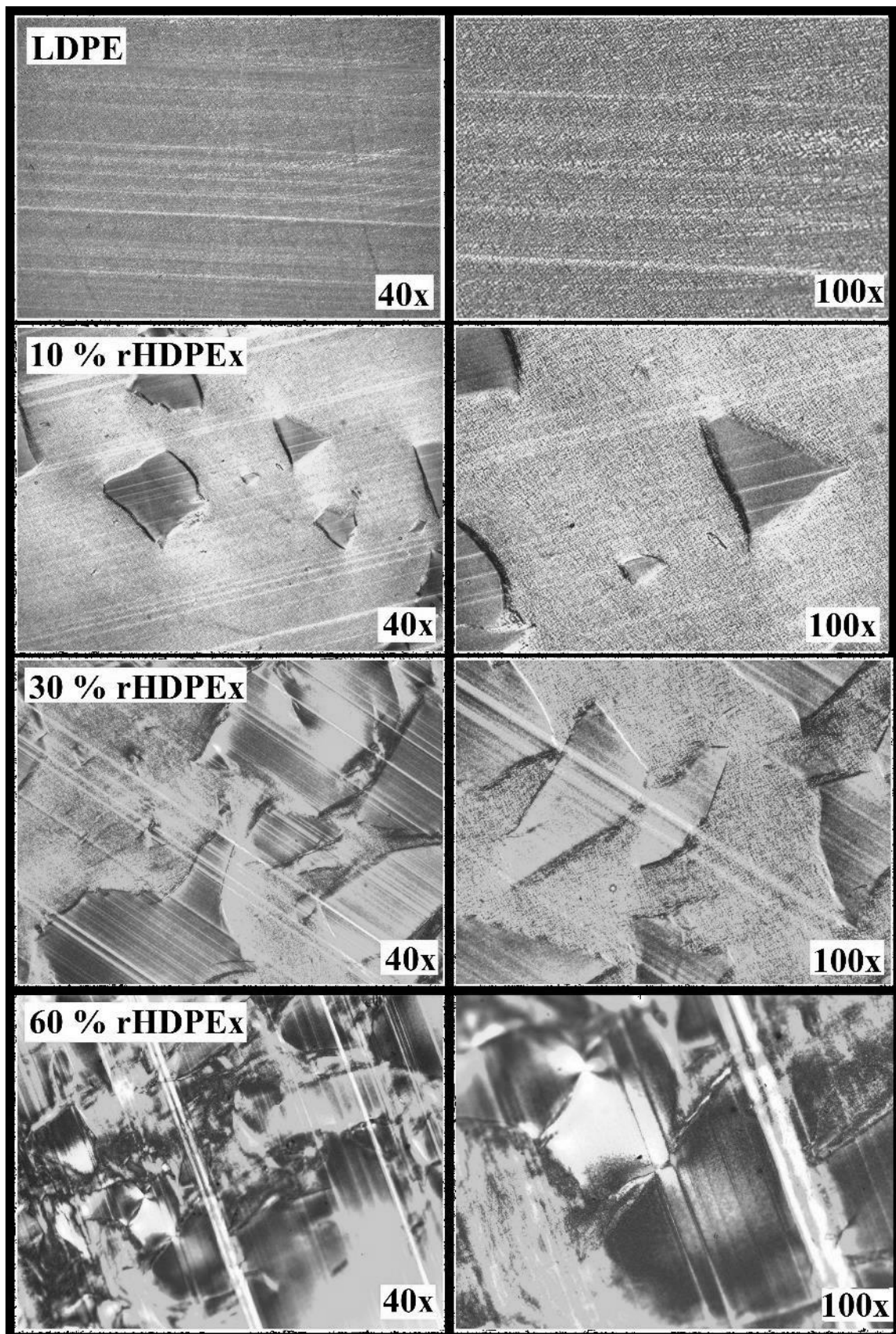
složek směsi. Mnoho studií se zabývalo omezenou vzájemnou mísitelností nemodifikovaných LDPE a HDPE a z jejich závěrů vyplývá, že tato závisí zejména na molekulové hmotnosti, distribuci molekulových hmotností a větvení řetězců a vždy tedy záleží na konkrétním typu LDPE nebo HDPE [66-69]. Nicméně zvýšení kompatibility lze dosáhnout i jinými prostředky, a to hlavně použitím různých kompatibilizátorů a nebo úpravou povrchových vlastností jedné nebo obou složek směsi [70-77]. Bednařík [77] se ve své studii zabýval vlivem ozáření na povrchové vlastnosti LDPE i HDPE. Z jeho výsledků vyplývá, že u HDPE ozářeného beta zářením, dávkou 165 kGy a energií 10 MeV, tedy stejným typem i parametry jako použitý recyklát, došlo k nárůstu povrchové energie na téměř dvojnásobek jeho původní hodnoty a zároveň vzrostlo množství polární složky povrchové energie na téměř šestnásobek původního množství. Povrchová energie, poťazmo její polární složka úzce souvisí s adhezními vlastnostmi povrchu. Pro vytvoření dobrého adhezního spojení je nutné, aby byl vytvořen těsný kontakt mezi adhezivem a adherentem. K tomu je zapotřebí, aby adhezivum mělo nižší povrchovou energii než adherent [78-79]. Vznik následné pevné vazby je u systémů polymer/plnivo popisován tzv. teorií adsorpce. Přičemž teorie adsorpce říká, že při vytvoření těsného kontaktu mezi adhezivem a adherentem dochází k transportu molekul na povrch adherentu, vytvoření určité formy rozhraní a následné vzájemné interakce sekundárních vazeb, neboli van der Waalsových sil. Pevnost spojení tedy závisí na velikosti těchto sil [78-80].

Předpoklad vzniku těsného kontaktu vlivem nižší povrchové energie adheziva (LDPE) a vyšší adherentu (rHDPE<sub>x</sub>) je, jak prokázal Bednařík ve své studii [77], vlivem beta záření splněn. Následná analýza struktury pomocí mikrotomových řezů ukázala, že dle teorie adsorpce došlo k vytvoření rozhraní na povrchu částic plniva, jak je vidět na Obr. 4.70 – 4.72. Detailnější rozbor struktury pomocí elektronového mikroskopu ukázal, že struktura obou složek směsi zůstala u všech tří směsí zachována, přičemž je patrné určité naorientování plniva podél vytvořeného rozhraní (viz. Obr. 4.73). Pevnost vzniklého rozhraní resp. vzájemná dobrá adheze mohla být navíc umocněna i určitou oxidací povrchu obou složek směsi. Ten byl pravděpodobně zoxidován během míchání směsí ve fluidní míchačce za pomoci tlakového vzduchu. Zkouškami mechanických vlastností pak bylo prokázáno, že u všech tří typů směsí došlo ke vzniku dostatečně pevného spojení mezi maticí a použitým plnivem.

Z hlediska nárůstu mechanických a tepelných vlastností při zachování relativně dobré zpracovatelnosti se jeví jako nejlepší varianta směs B, neboli kombinace granulátu LDPE a prášku rHDPE<sub>x</sub>. Nicméně z ekonomického hlediska je nejvýhodnější směs A (granulát LDPE a drť rHDPE<sub>x</sub>), jelikož u ní odpadají dodatečné náklady na další technologickou operaci – mletí. Celkově lze říci, že pozitivní účinek přídatku zesíťovaného polyetyleny ve funkci plniva byl zaznamenán u všech tří typů směsí a záleží tak hlavně na výrobcí, resp. zvolené aplikaci, která z variant bude nejvýhodnější.

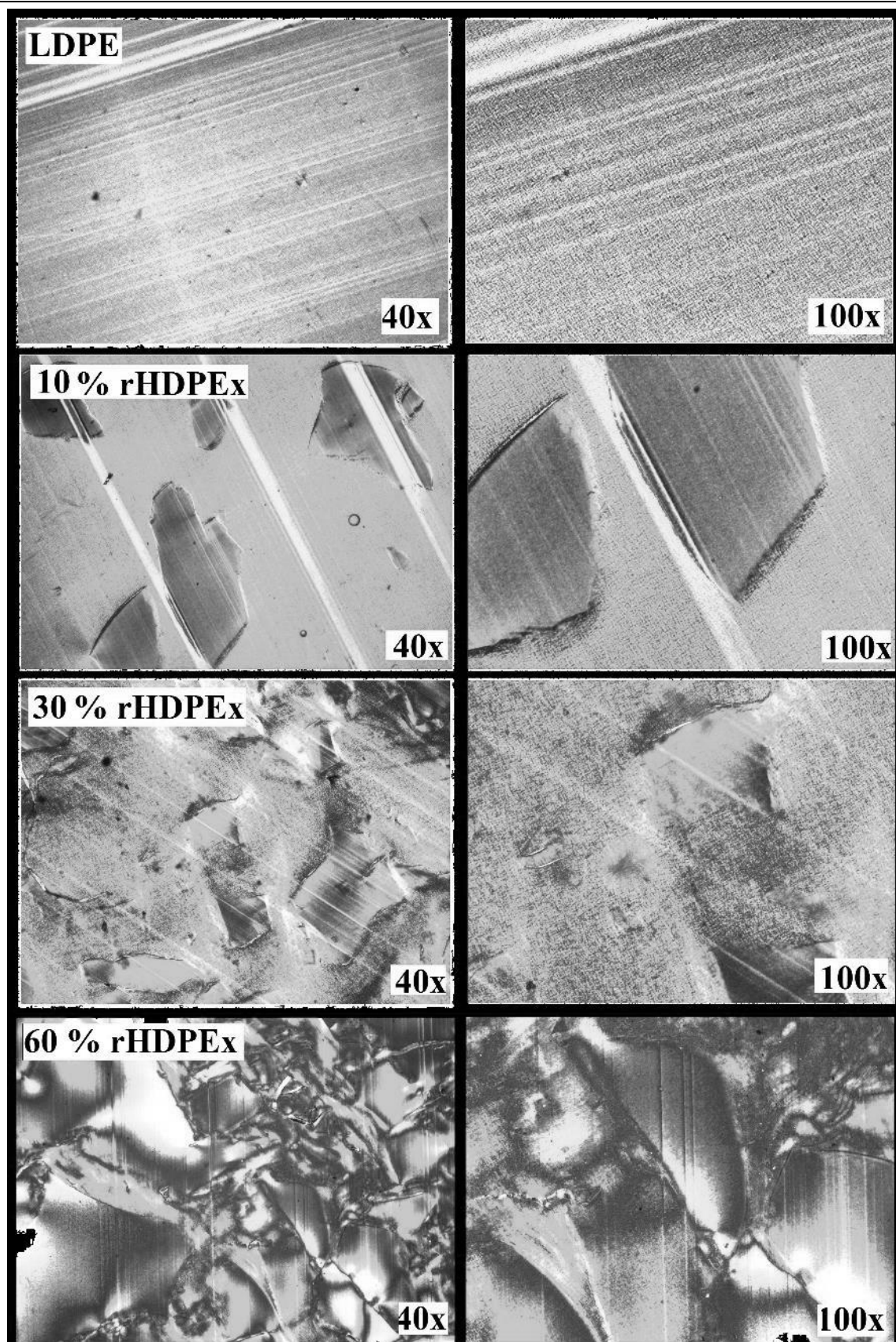


Obr. 4.70: Struktura směsi A



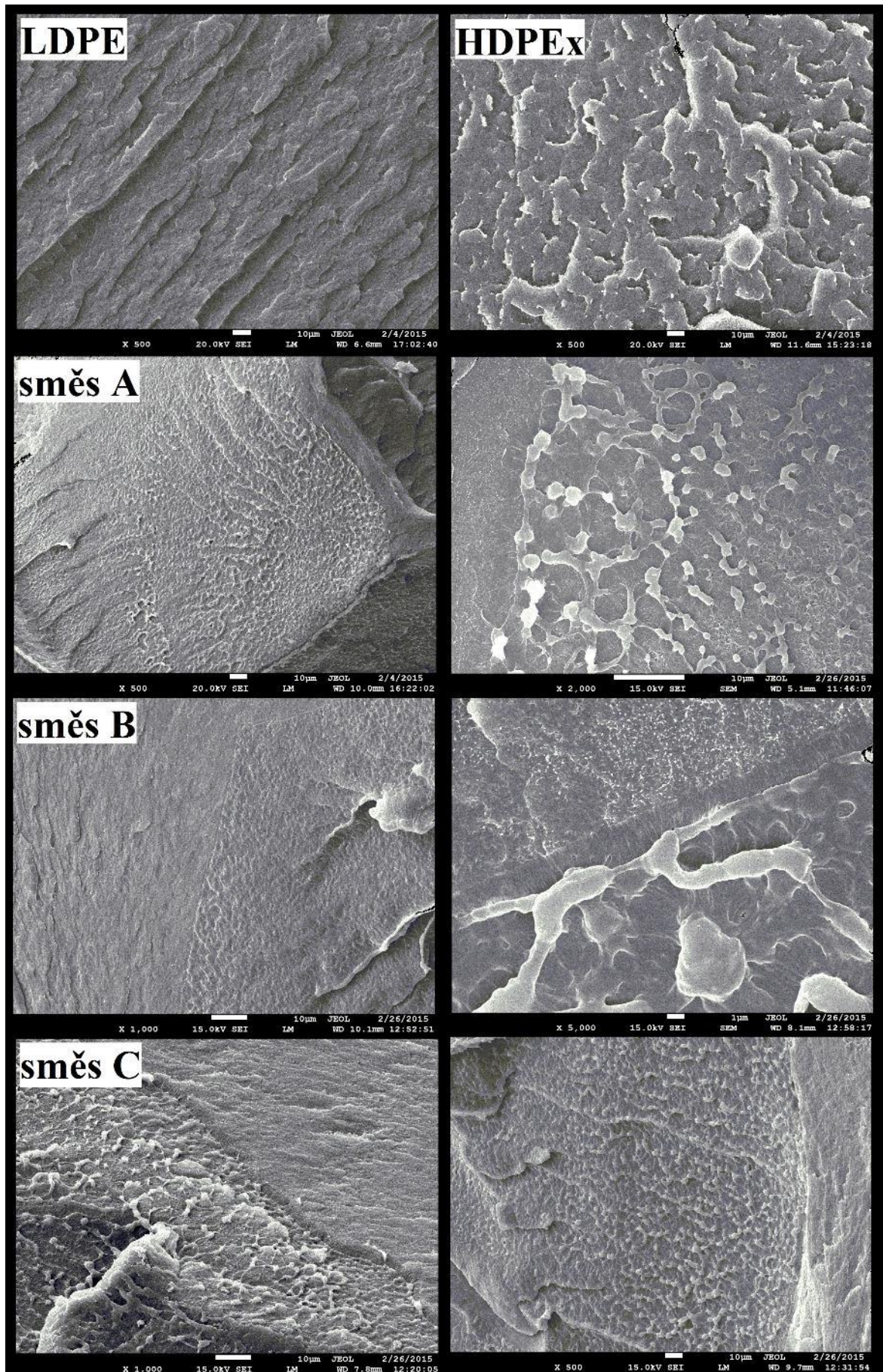
Obr. 4.71: Struktura směsi B





Obr. 4.72: Struktura směsi C

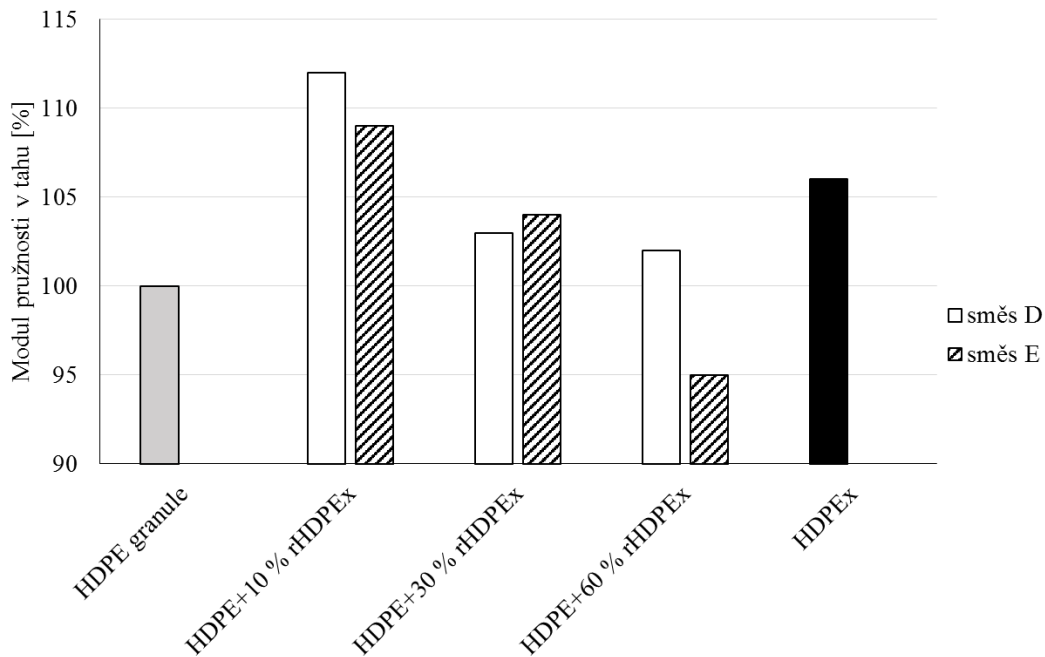




Obr. 4.73: Srovnání struktury směsí

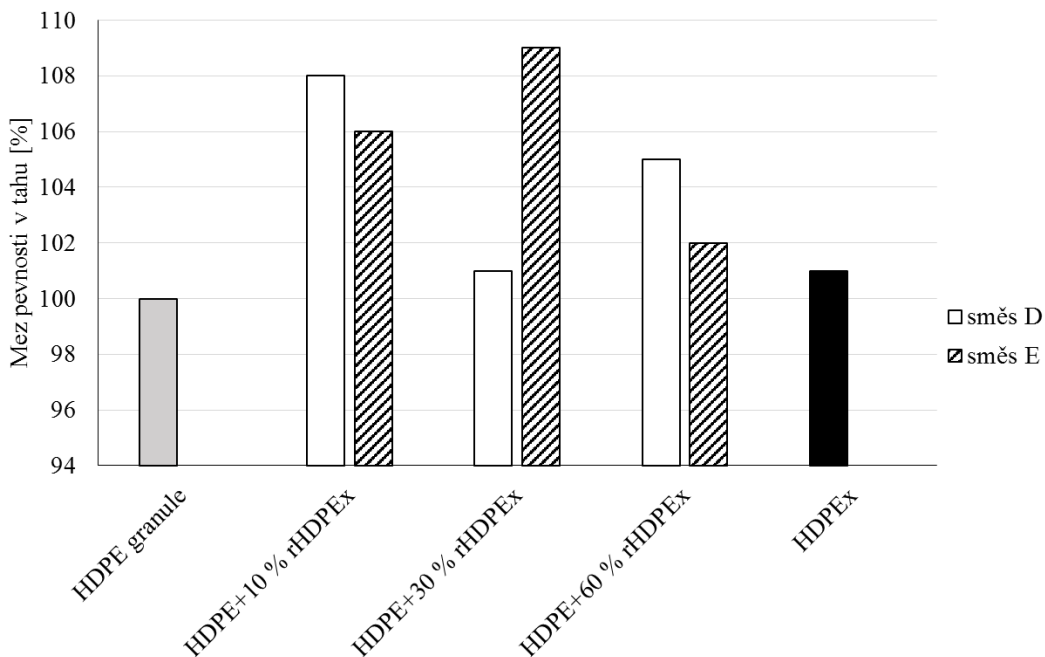


## 4.7 Diskuze výsledků směsí D-E



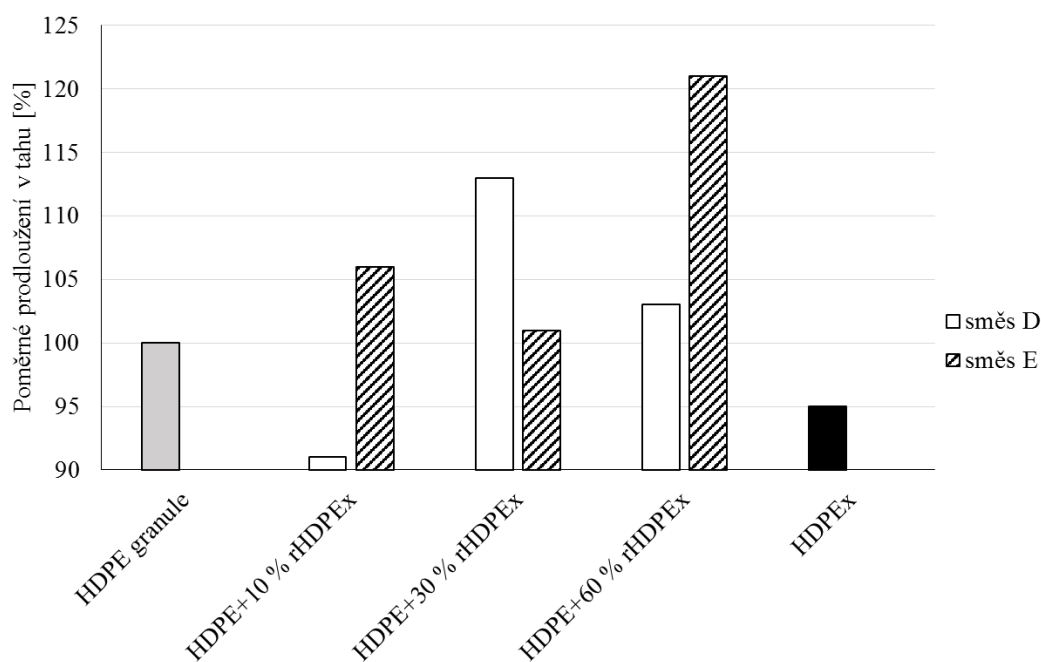
Obr. 4.74: Srovnání modulu pružnosti v tahu za pokojové teploty

Porovnání tahových vlastností směsí D a E, tj. směsí u nichž je matrice tvořena materiálem HDPE, ukázalo, že je za pokojové teploty nelze jednoznačně kvantifikovat. Z hlediska modulu pružnosti v tahu (Obr. 4.74) dochází nejprve k nárůstu a poté k poklesu. To by mohlo být způsobeno zvětšujícím se podílem adhezních sil na celkové soudržnosti směsi u vyšších koncentrací, u nichž dochází k mnohem více interakcím mezi plnivem a matricí. Z toho plyne, že tyto adhezní síly mají nižší pevnost než vlastní koheze jednotlivých složek směsi a tudíž nastává pokles.



Obr. 4.75: Srovnání meze pevnosti v tahu za pokojové teploty

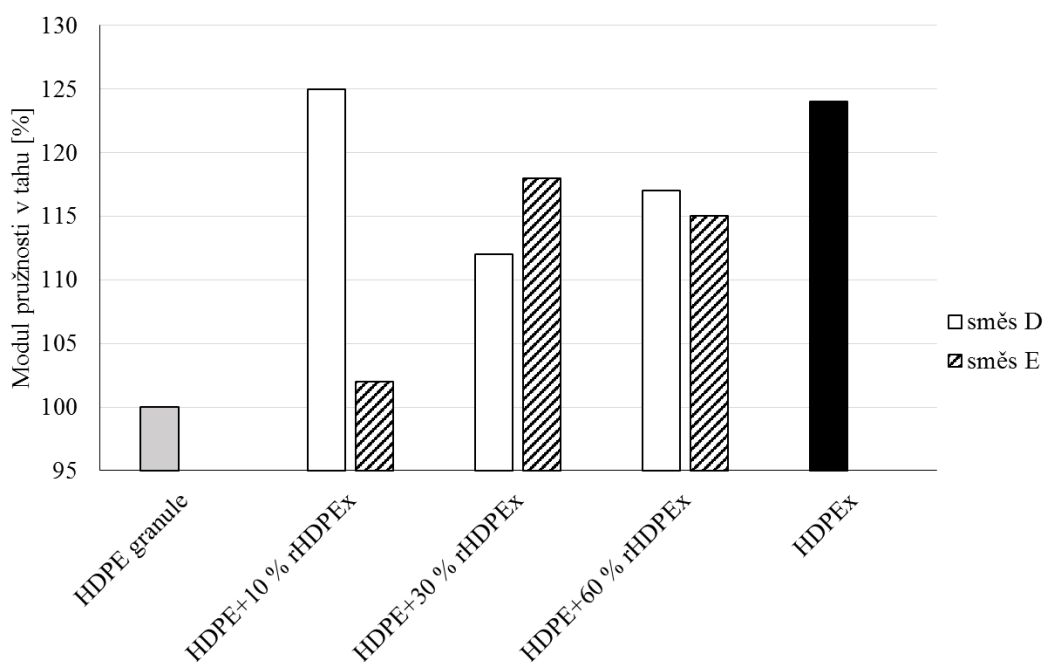
Tento fakt je částečně potvrzen i u meze pevnosti v tahu (Obr. 4.75). U vyšších koncentrací plnění jsou její hodnoty nižší než u koncentrací nižších. Nicméně rozdíly mezi jednotlivými koncentracemi jsou pouze v rámci jednotek procent. Důležitým poznatkem je, že hodnoty modulu pružnosti i meze pevnosti v tahu jsou téměř u všech koncentrací obou typů směsi o něco vyšší než u původního materiálu. U meze pevnosti v tahu jsou dokonce vyšší než HDPE<sub>x</sub> ozářené stejnou dávkou a typem záření jako použité plnivo.



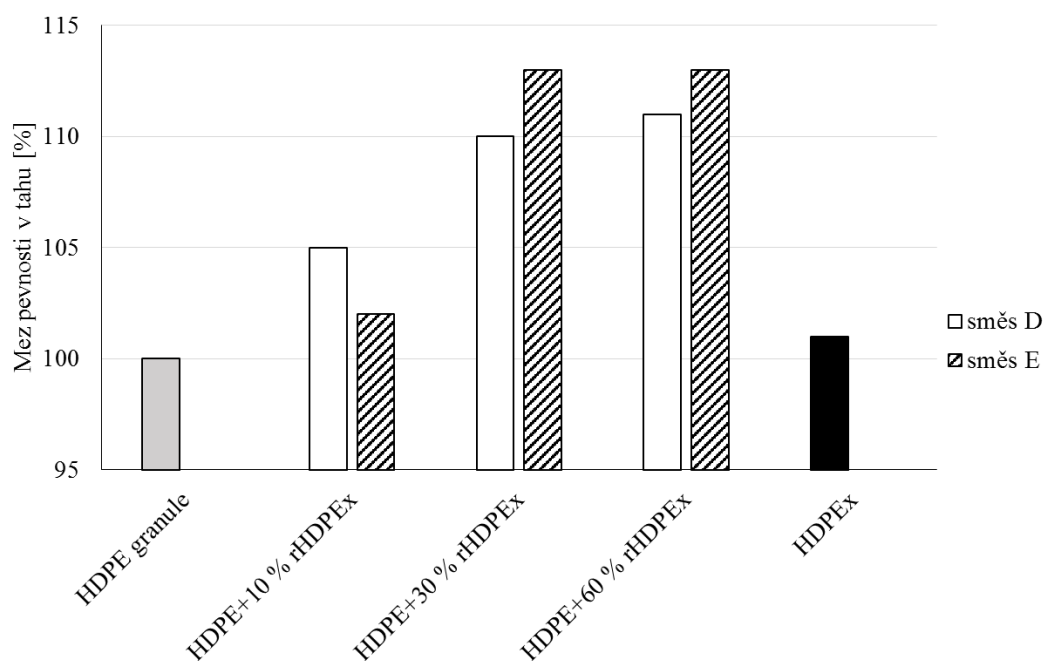
Obr. 4.76: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty

Výsledky poměrného prodloužení v tahu za pokojové teploty korelují s výsledky modulu pružnosti, resp. meze pevnosti v tahu (Obr. 4.76). Dá se říci, že u koncentrací s vyšším modulem pružnosti, resp. mezí pevnosti v tahu bylo naměřeno nižší poměrné prodloužení v tahu a naopak u koncentrací s nižším modulem pružnosti, resp. mezí pevnosti v tahu bylo naměřeno vyšší poměrné prodloužení v tahu.

Za zvýšené teploty se u tahových vlastností nepotvrdil negativní vliv adhezní složky sil a naopak dochází k nárůstu jak modulu pružnosti, tak meze pevnosti v tahu s rostoucím podílem plniva (Obr. 4.77 a 4.78). Z toho se dá vyvodit, že za zvýšené teploty je naopak velikost vlastních kohezních sil nižší než velikost sil adhezních, které jsou u vyšších koncentrací dominantní.



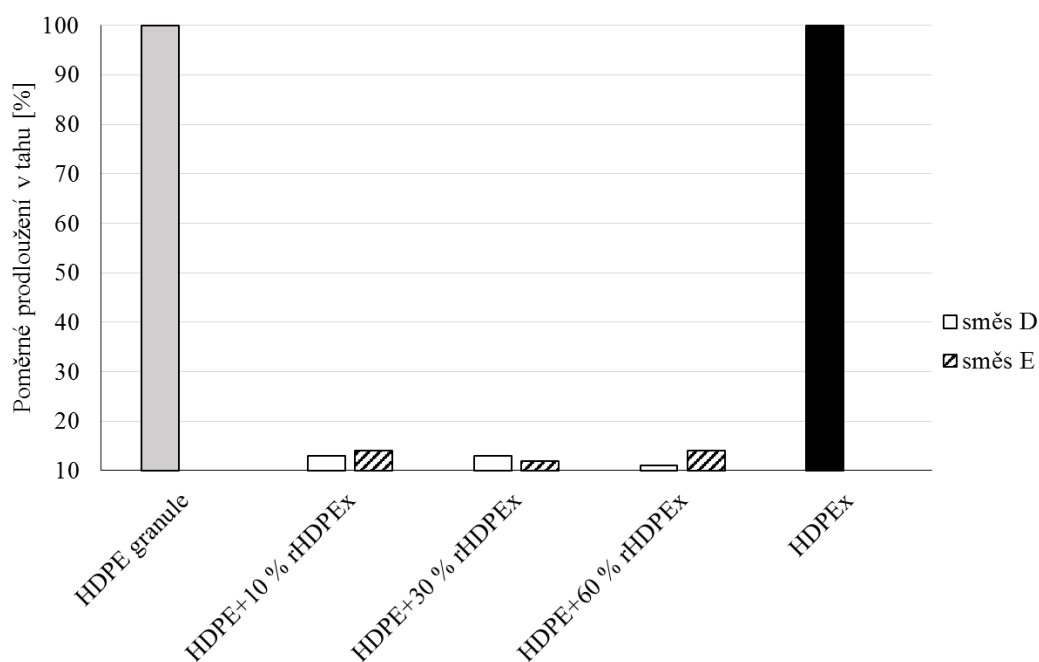
Obr. 4.77: Srovnání modulu pružnosti v tahu za zvýšené teploty



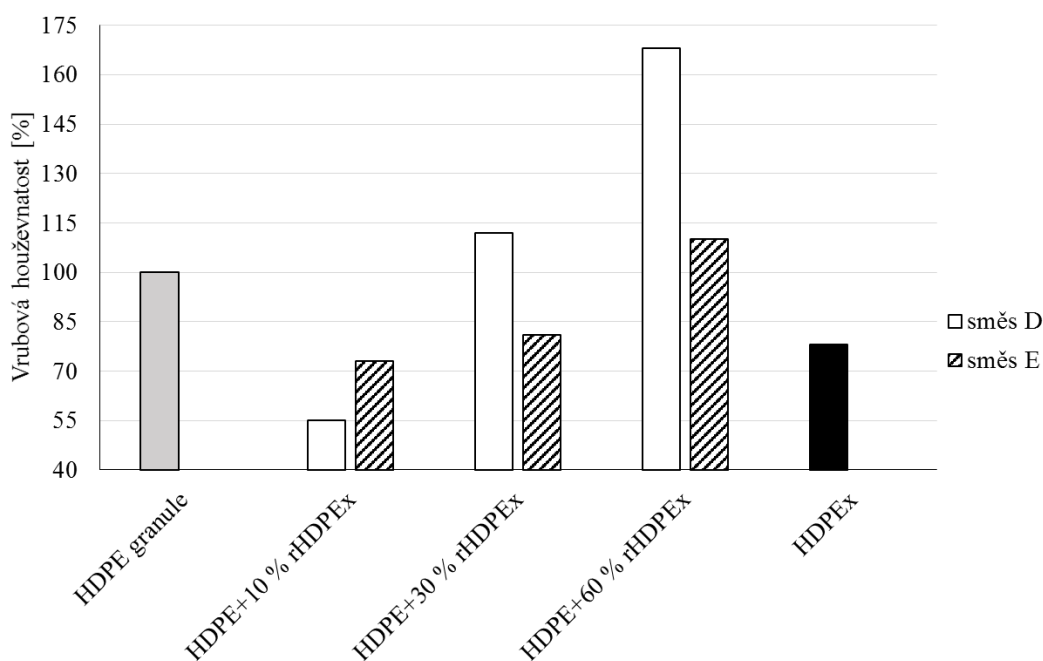
Obr. 4.78: Srovnání meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty

Výsledek poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty (Obr. 4.79) ukázal, že u obou typů směsi došlo k výrazné ztrátě houževnatosti, což koreluje s nárůstem pevnosti i tuhosti. Poměrné prodloužení v tahu kleslo o téměř 90 %, přičemž tento pokles je u obou směsí srovnatelný bez ohledu na koncentraci. Lze tedy vidět, že zvýšená teplota působí pozitivně na tuhost i pevnost, ale naopak velmi negativně na výslednou houževnatost směsí.





Obr. 4.79: Srovnání poměrného prodloužení v tahu za zvýšené teploty

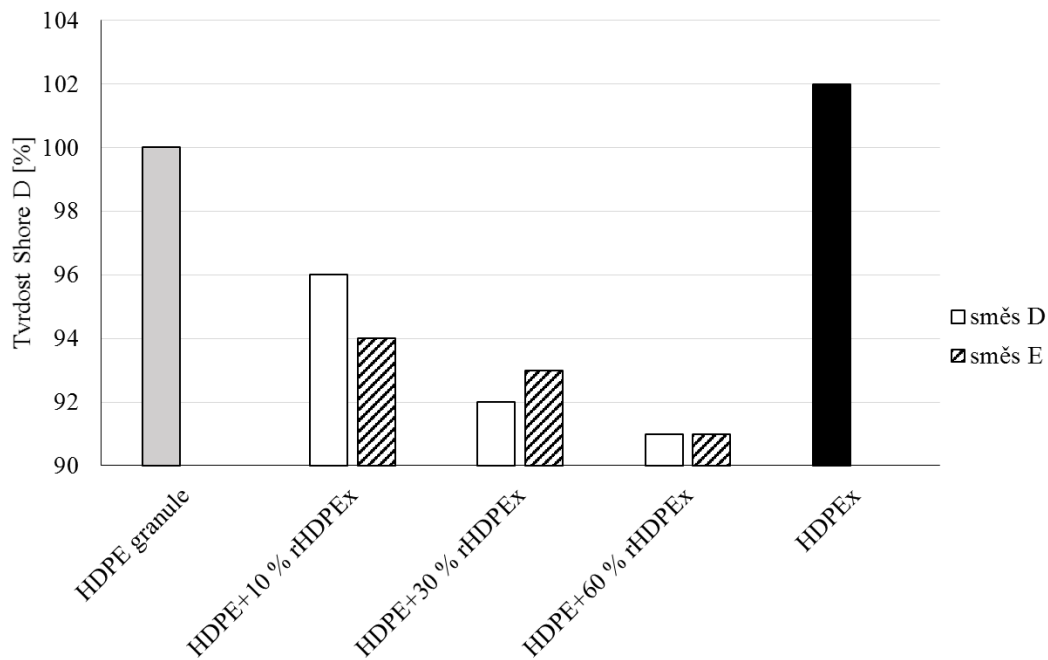


Obr. 4.80: Srovnání vrubové houževnatosti

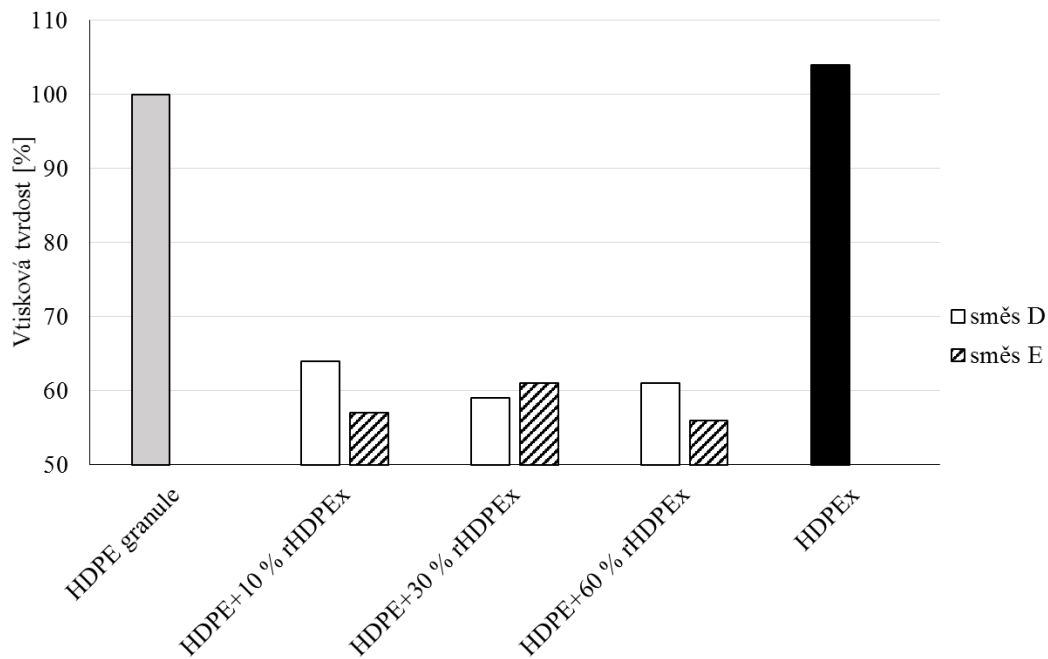
Na Obr. 4.80 je znázorněno srovnání vrubové houževnatosti. Výsledky korelují s daty získanými při měření tahových vlastností za pokojové teploty. Opět je vidět, že směsi s vyšším modulem pružnosti, resp. mezí pevnosti v tahu mají nižší houževnatost a vice versa.

Z hlediska tvrdosti a mikrotvrdosti lze pozorovat negativní vliv použitého plniva (Obr. 4.81 a 4.82). U obou vlastností dochází k poklesu s rostoucím podílem plniva, přičemž rozdíl mezi výsledky směsí s plnivem ve formě drti (směš D) a směsí s plnivem ve formě prášku (směš E) je zanedbatelný. Pokles Shore D

tvrdosti je pouze v rámci jednotek procent, na rozdíl od vtiskové tvrdosti reprezentující mikrotvrdost, která poklesla téměř na polovinu. Lze tedy pozorovat, že ovlivnění tvrdosti povrchové vrstvy je mnohem výraznější.



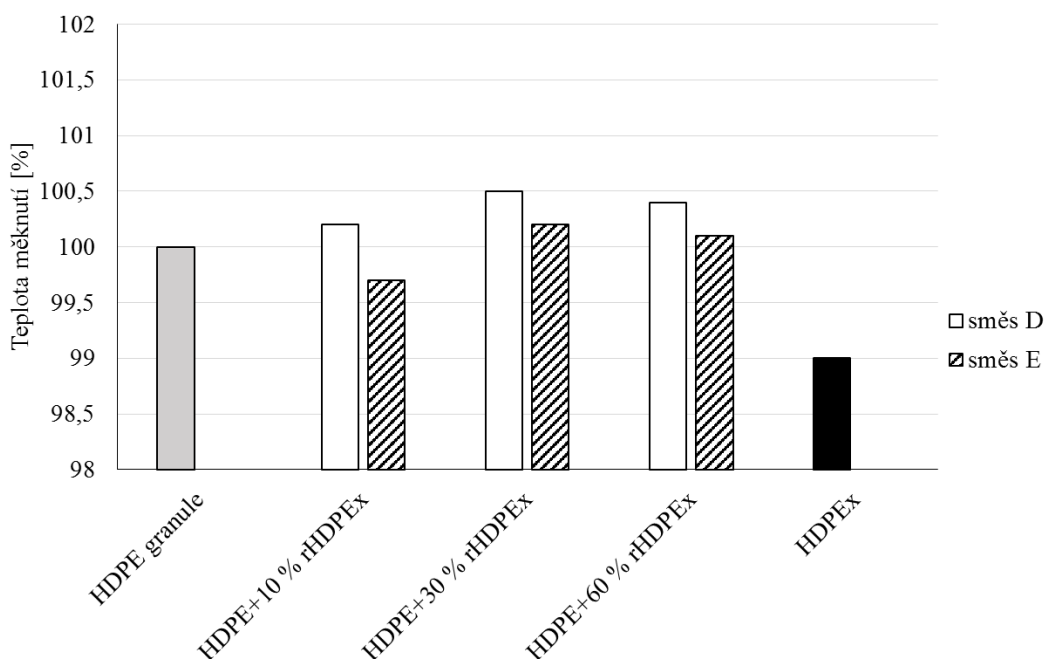
Obr. 4.81: Srovnání tvrdosti



Obr. 4.82: Srovnání výsledků mikrotvrdosti

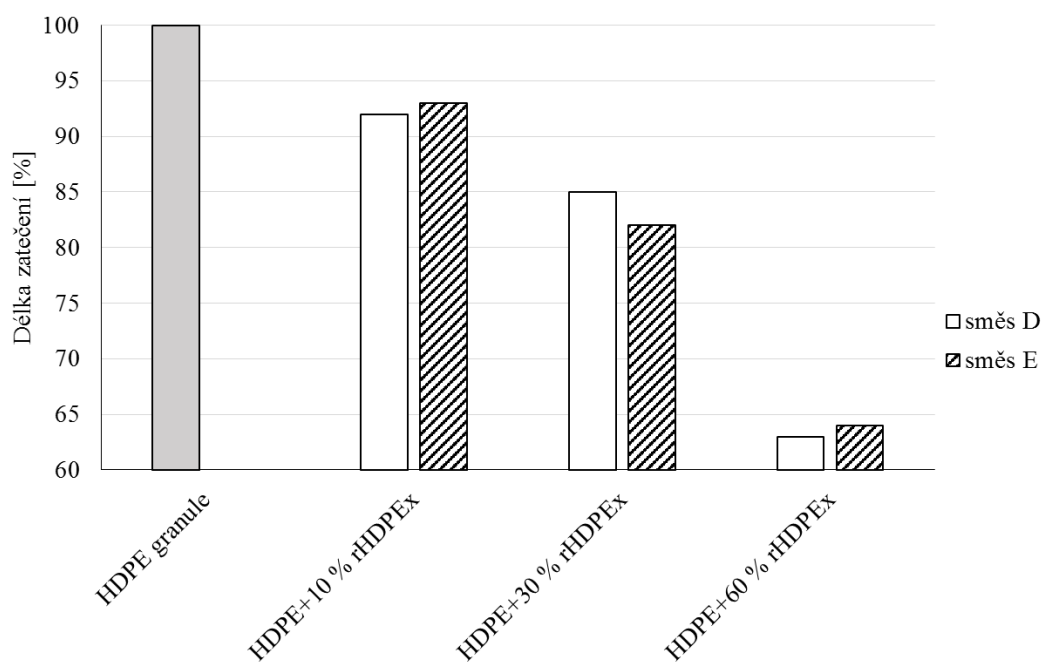
Z výsledků mechanických zkoušek vyplývá, že vliv velikosti částic plniva nelze jednoznačně určit. U některých vlastností, resp. koncentrací jsou rozdíly mezi oběma směsmi výraznější, u některých jsou téměř zanedbatelné. Obecně lze říci, že u obou směsí, bez ohledu na koncentraci, došlo ke zvýšení tuhosti i pev-

nosti oproti původnímu materiálu. Na druhou stranu houževnatost byla velmi závislá na obou výše zmíněných faktorech. Tvrdost i mikrotvrdost byla u všech koncentrací nižší než původní materiál.



Obr. 4.83: Srovnání teploty měknutí

Tepelné vlastnosti zůstali u všech koncentrací prakticky nezměněny bez ohledu na výchozí formu plniva (Obr. 4.83). Rozdíl mezi původním materiálem a zkoumanými směsmi je maximálně 0,5 %, tudíž lze konstatovat, že sledované tepelné vlastnosti zůstaly zachovány.

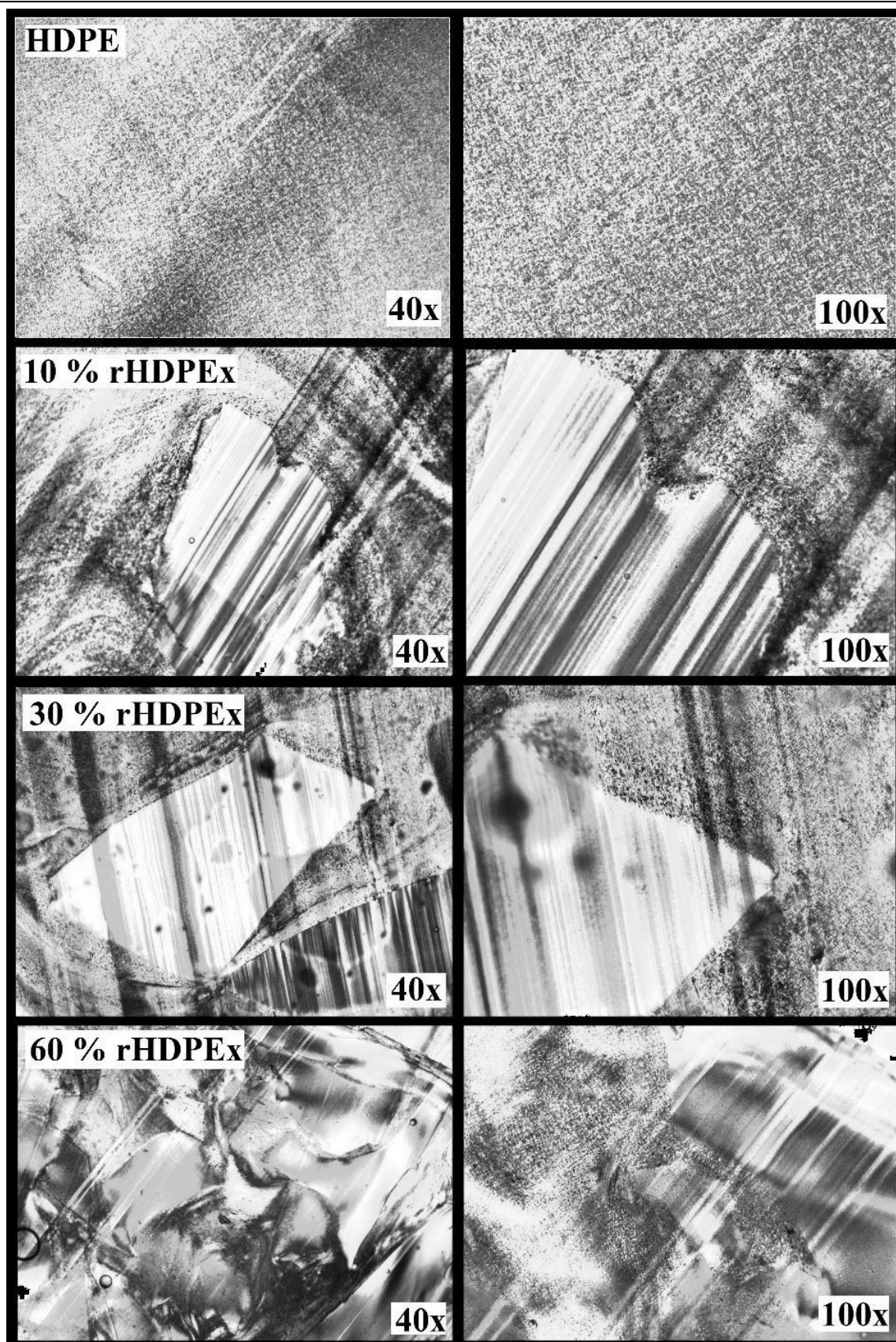


Obr. 4.84: Srovnání zatékavosti

Změna tokových vlastností měřena na Archimédově spirále prokázala negativní účinek přídatku plniva (Obr. 4.84). Pokles je u nižších koncentrací relativně malý, s rostoucím podílem je pokles mnohem výraznější. Délka zatečení je u obou směsí podobná a velikost částic plniva tak neměla prakticky žádný vliv.

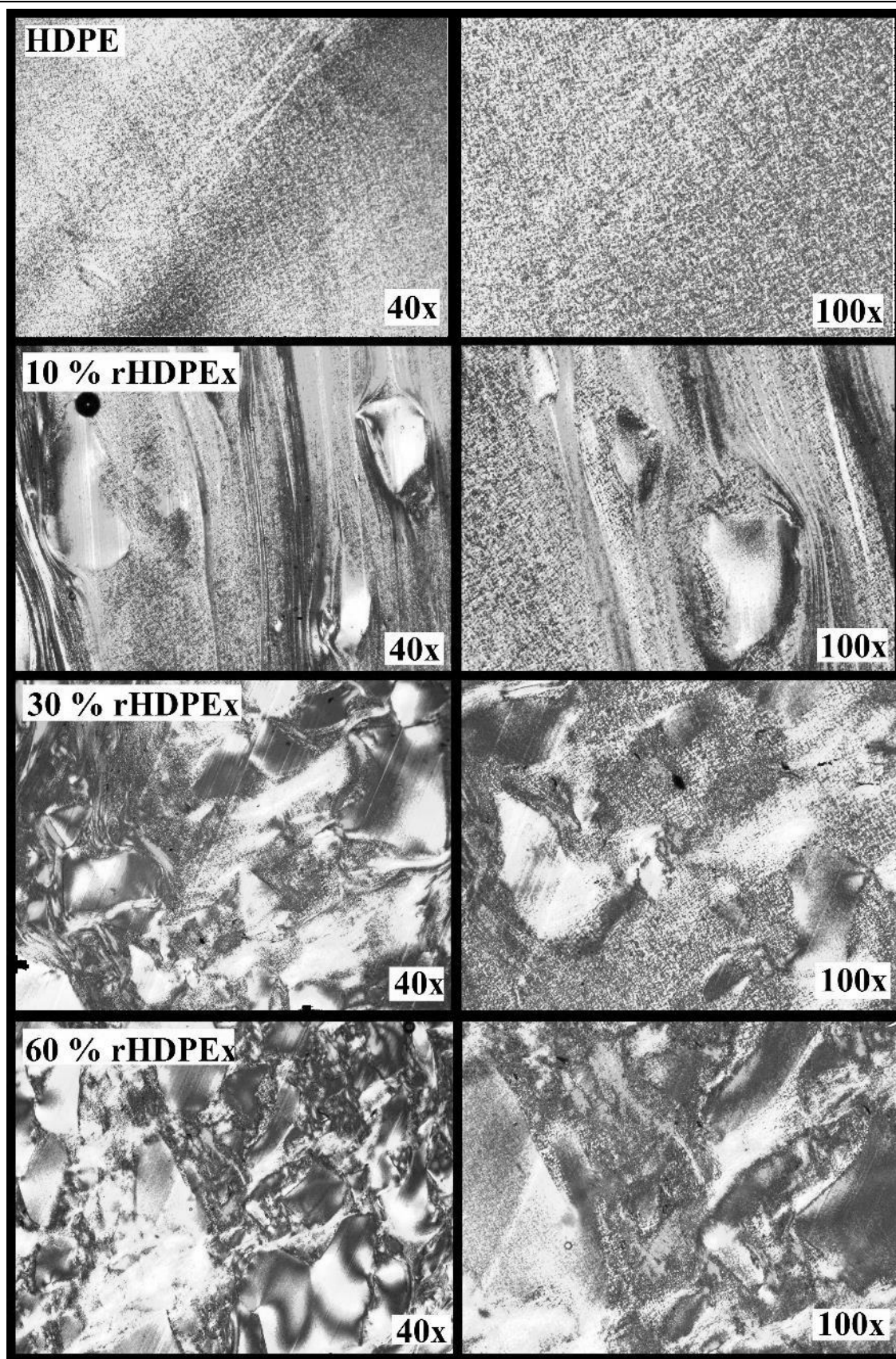
Předpoklad vzniku těsného spojení byl mezi oběma složkami směsi splněn [77] a na základě rozboru struktury byl dle teorie adsorpce [78-80] potvrzen vznik rozhraní u obou typů směsi (Obr. 4.85 a 4.86). Navíc pravděpodobně opět došlo k oxidaci povrchu obou složek směsi během míchání ve fluidní míchačce, což by taktéž mělo vést ke zvýšení vzájemné adheze. Nicméně z naměřených výsledků je patrné, že u sledovaných vlastností dochází k určitým výkyvům v rámci jednotlivých typů směsi a nelze tak jednoznačně charakterizovat výsledné chování. Tyto výkyvy by mohli být způsobeny tím, že došlo k určitému rozbití částic plniva. Ze strukturní analýzy pomocí elektronového mikroskopu je patrné (Obr. 4.87), že některé částice byly rozbity na menší útvary, které mají vláknitou strukturu s průměrem několika mikrometrů, ale poměrně slabou adhezi k matrici. Změny ve struktuře a vzniklé dutiny na rozhraní částic a matrice mohou působit jako určité nestability a být tak příčinou pozorovaných výkyvů mechanických vlastností. K rozbití částic plniva došlo pravděpodobně během zpracovatelského procesu vlivem vysoké viskozity HDPE matrice a tudíž značného smykového namáhání. Tokové křivky HDPE i LDPE znázorňující rozdíly ve viskozitě mezi těmito materiály jsou zobrazeny v příloze C.

I přes pozorované výkyvy výsledky ukázali použitelnost recyklátu z ozářeného HDPE jako plniva i do materiálu s velmi podobnými vlastnostmi. Nicméně výsledné chování směsi velmi výrazně závisí na dané koncentraci. Využitelnost v praxi tedy opět záleží na výrobcí, resp. možné aplikaci. Velikost částic směsi je v tomto případě zanedbatelná, protože obě směsi vykazovali obdobné chování. Na základě ekonomického hlediska je tedy nejvýhodnější směs D, protože u ní odpadají dodatečné náklady na mletí.



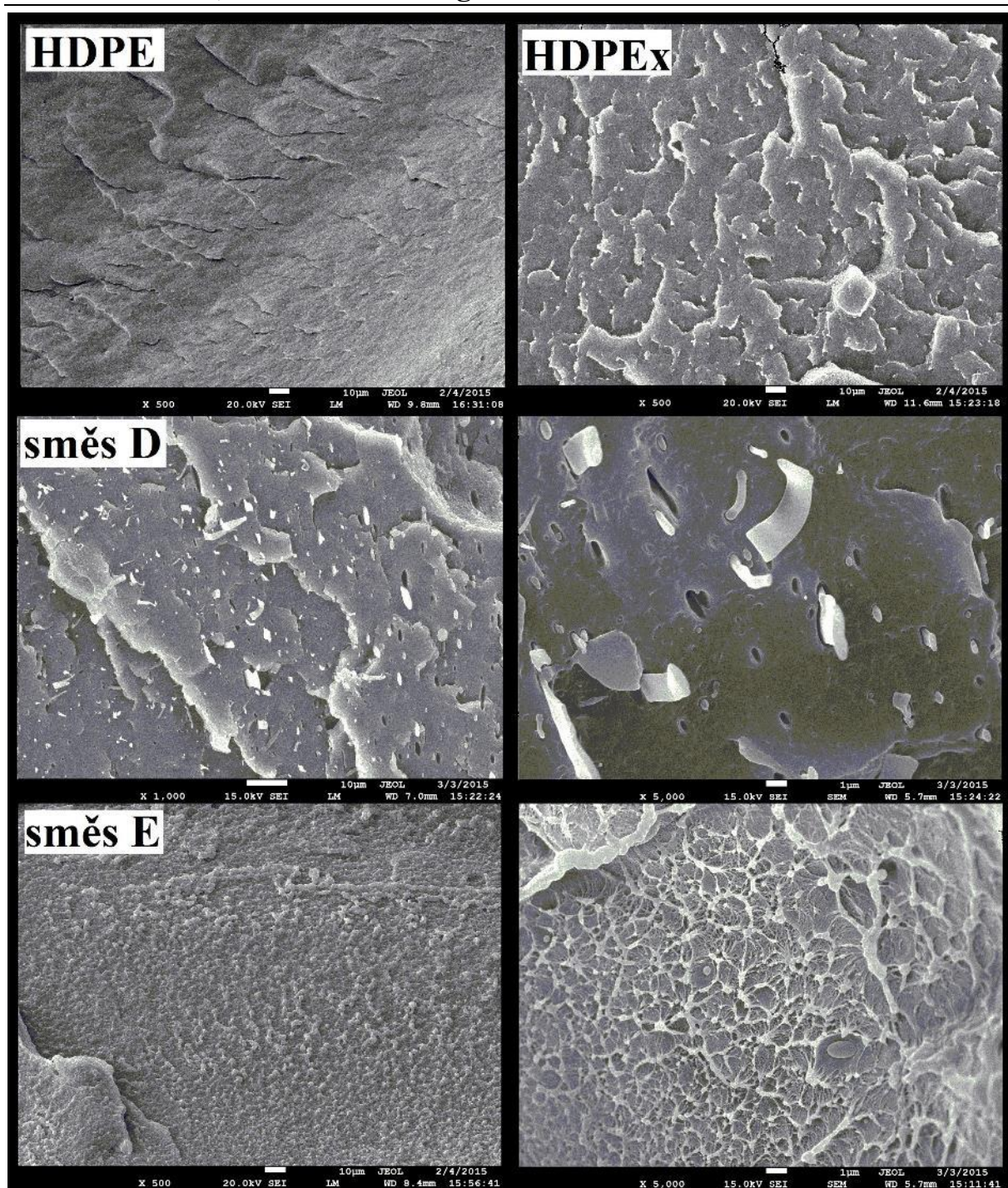
Obr. 4.85: Struktura směsi D





Obr. 4.86: Struktura směsi E





Obr. 4.87: Srovnání struktury směsí

## 5 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

S ohledem na narůstající spotřebu takto modifikovaných polymerů je k dispozici stále větší objem neshodných výrobků, či výrobků na konci jejich životnosti bez definování možností jejich opětovného zpracování. Přínos práce je tedy shrnut v následujících bodech:

- Navržení řešení možného opětovného zpracování radiačně zesíťovaného vysoko-hustotního polyetyleny (rHDPE<sub>x</sub>)
- Stanovení uceleného přehledu vlastností směsí LDPE/rHDPE<sub>x</sub> a HDPE/rHDPE<sub>x</sub> s ohledem na zpracovatelské procesy a použití
- Zvýšení návratnosti nákladů na ozařování výrobků z HDPE při opětovném použití neshodných kusů nebo výrobků na konci životního cyklu
- Snížení nákladů na výrobu nových výrobků ze směsí LDPE/rHDPE<sub>x</sub> a HDPE/rHDPE<sub>x</sub>
- Možnost přípravy směsi s vlastnostmi „šitými na míru“ dle požadavků zpracovatele
- Opětovné zpracování výrobků z HDPE<sub>x</sub> přispívá ke snížení zátěže životního prostředí



## 6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této disertační práce bylo definovat možnost použití recyklátu z ozářeného vysoko-hustotního polyetyleny (rHDPE<sub>x</sub>) jako plniva do jiných materiálů a následně popsat výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti nově vzniklých materiálů.

Jako polymerní matrice byl použit nízko-hustotní polyetylen (LDPE) a vysoko-hustotní polyetylen (HDPE). Na základě těchto materiálů bylo připraveno pět různých kombinací směsí v koncentracích plniva od 10 do 60 %, které se od sebe lišili zejména výchozí formou jednotlivých složek směsi (granule/prášek/drt').

Připravené směsi byly míchány ve fluidní míchačce za pomoci tlakového vzduchu a ihned poté zpracovány vstřikováním do podoby zkušebních tělísek. Takto připravené a zpracované směsi byly podrobeny zkouškám mechanických, tepelných a tokových vlastností. Naměřené výsledky byly doplněny strukturní analýzou pro stanovení uceleného přehledu výsledného chování.

Z hlediska mechanického chování byl u všech směsí s LDPE matricí pozorován nárůst tuhosti, pevnosti a tvrdosti, resp. mikrotvrdosti, což koreluje s pozorovanou ztrátou houževnatosti. Tepelné vlastnosti zastoupené teplotou měknutí dle Vicata taktéž vzrostli s rostoucím stupněm plnění. Pozitivní změna tepelného a mechanického chování byla vykoupena zhoršením tokového chování a s tím související zpracovatelností. Rozbor struktury ukázal vznik určité formy rozhraní mezi plnivem a matricí, přičemž výborná soudržnost obou složek směsi je nejpravděpodobněji způsobena změnou povrchových vlastností, které se změnili nejen původním ozářením použitého plniva, ale také částečnou oxidací během vzájemného míchání ve fluidní míchačce za použití tlakového vzduchu.

U směsí s HDPE matricí je situace složitější, protože u nich nelze jednoznačně stanovit závislost výsledných vlastností na množství použitého plniva. Strukturní analýza sice potvrdila vznik rozhraní mezi matricí a plnivem a podmínky pro vznik dobrého adhezního spojení zůstali taktéž zachovány; nicméně detailnější rozbor ukázal, že u některých částic plniva došlo během zpracování k jejich dočasnému rozbití vlivem vysokého smykového namáhání. Tyto pak působí ve struktuře jako jakási forma nestability, což se projevilo určitými výkyvy v pozorovaných vlastnostech. Navzdory těmto výkyvům lze vidět, že došlo opět k nárůstu pevnosti a tuhosti. Na druhou stranu klesla tvrdost i mikrotvrdost a houževnatost byla velmi závislá na dané koncentraci plnění. Tepelné vlastnosti zkoumaných směsí zůstaly beze změny a tokové chování se s rostoucím podílem plniva zhoršuje stejně jako u směsí s LDPE matricí.

Výsledky ukázaly použitelnost recyklátu z radiačně zesíťovaného materiálu jako plniva, přičemž výsledné chování závisí nejen na vzájemné soudržnosti jednotlivých složek směsi, ale taktéž na volbě jejich vhodné kombinace. Výsledek práce představuje původní řešení, které vyústilo v podání patentové přihlášky číslo PV2014-479 s názvem Ztužující plnivo pro směsi s polymerní matricí.

**LITERATURA**

- [1] ELIAS, H.G. *An Introduction to Plastics*. 2<sup>nd</sup> ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 409 p. ISBN 978-3-527-29602-6
- [2] GOODSHIP, V. *Introduction to Plastics Recycling*. 2<sup>nd</sup> ed. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology, 2007. 174 p. ISBN 978-1-84735-085-5
- [3] ZEMAN, L. *Vstříkování plastů. Úvod do vstříkování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2009. 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3
- [4] BEAUMONT, J.P., NAGEL, R., SHERMAN, R. *Successful Injection Molding. Process, Design, and Simulation*. Munich: Hanser Publishers, 2002. 362 p. ISBN 1-56990-291-7
- [5] OSSWALD, T.A. *International Plastics Handbook. The Resource to Plastics Engineers*. 4<sup>th</sup> ed. Munich: Hanser Publishers, 2006. 902 p. ISBN 978-1-56990-399-5
- [6] DUCHÁČEK, V. *Polymery. Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0
- [7] CRAWFORD, R.J. *Plastics Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 352 p. ISBN 978-0-7506-3764-0
- [8] PEACOCK, A.J., CALHOUN, A. *Polymer Chemistry. Properties and Applications*. Munich: Hanser Publishers, 2006. 397 p. ISBN 978-1-56990-397-1
- [9] EHRENSTEIN, G.W. *Polymeric Materials. Structure, Properties, Applications*. Munich: Hanser Publishers, 2001. 277 p. ISBN 1-56990-310-7
- [10] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů. Vstříkování termoplastů*. 2. vyd. Brno: Uniplast, 1999. 133 s.
- [11] DROBNY, J.G. *Handbook of Thermoplastic Elastomers*. Norwich: William Andrew Publishing, 2007. 520 p. ISBN 978-0-8155-1549-4
- [12] BRANDRUP, J. *Recycling and Recovery of Plastics*. Munich: Hanser Publishers, 1996. 893 p. ISBN 1-56990-214-3
- [13] WHITE, J.L., CHOI, D.D. *Polyolefins. Processing, Structure Development, and Properties*. Munich: Hanser Publishers, 2005. 271 p. ISBN 978-1-56990-369-8
- [14] CHEREMISINOFF, N.P. *Advanced Polymer Processing Operations*. Westwood: Noyes Publications, 1998. 287 p. ISBN 978-0-8155-1426-8
- [15] CLELAND, M.R., PARKS, L.A., CHENG, S. Applications for Radiation Processing of Materials, *J. of Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B*. 2003, vol. 208, p. 66-73.
- [16] CLOUGH, R.L. High-Energy Radiation and Polymers: A Review of Commercial Processes and Emerging Applications. *J. of Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B*. 2001, vol. 185, p. 8-33.

- [17] DROBNY, J.G. *Ionizing Radiation and Polymers*. Principles, Technology, and Applications. Oxford: William Andrew, 2013. 298 p. ISBN 978-1-4557-7881-2
- [18] CHMIELEWSKI, A.G., HAJI-SAEID, M., AHMED, S. Progress in Radiation Processing of Polymers, *J. of Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B*. 2005, vol. 236, p. 44-54.
- [19] DROBNY, J.G. *Radiation Technology for Polymers*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 307 p. ISBN 978-1-4200-9404-6
- [20] MAKUUCHI, K., CHENG, S. *Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 415 p. ISBN 978-0-470-58769-0
- [21] MASSEY, L.K. *The Effects of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers*. The Definitive User's Guide and Databook. 2<sup>nd</sup> ed. Norwich: William Andrew Publishing, 2005. 413 p. ISBN 978-0-8155-1505-0
- [22] BEREJKA, J., CLELAND, M.R. Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-Rays, *Int. At. Energy Agency*, 2011.
- [23] MASEFIELD, J. Reflections on the Evolution and Current Status of the Radiation Industry. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2004, vol. 71, no. 1-2, p. 9-16.
- [24] CHEN, J., CZAYKA, M., URIBE, R.M. Effects of Electron Beam Irradiations on the Structure and Mechanical Properties of Polycarbonate. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2005, vol. 74, no. 1, p. 31-35.
- [25] KERLUKE, D.R., CHENG, S. Radiation Processing of Polymers: The Current Status and Prospects for the Future. *ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*. Brookfield: Society of Plastics Engineers, 2004, vol. 3, p. 3738-3739.
- [26] VOIT, W., WARE, T., GALL, K. Radiation Crosslinked Shape-Memory Polymers. *J. of Polymer*. 2010, vol. 51, no. 15, p. 3551-3559.
- [27] CHENG, S., KERLUKE, D.R. Radiation Processing for Modification of Polymers. *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*. Brookfield: Society of Plastics Engineers, 2003, vol. 3, p. 2694-2699.
- [28] ROUIF, S. Radiation Cross-Linked Polymers: Recent Developments and New Applications. *J. of Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B*. 2005, vol. 236, no. 1-4, p. 68-72.
- [29] GEHRING, J. With Radiation Crosslinking of Engineering Plastics into the Next Millennium. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2000, vol. 57, no. 3-6, p. 361-365.
- [30] CHENG, S., PHILLIPS, E., PARKS, L. Processability Improvement of Polyolefins through Radiation-Induced Branching. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2010, vol. 79, no. 3, p. 329-334.

- [31] GEHRING, J., ZYBALL, A. Radiation Crosslinking of Polymers – Status, Current Issues, Trends and Challenges. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 1995, vol. 46, no. 4-6, p. 931-936.
- [32] MURRAY, K.A. et al. The Effects of High Energy Electron Beam Irradiation on the Thermal and Structural Properties of Low Density Polyethylene. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2012, vol. 81, no. 8, p. 962-966.
- [33] ZAGORSKI, Z.P. EB – Crosslinking of Elastomers, How Does It Compare with Radiation Crosslinking of Other Polymers?. *J. of Radiat Phys. Chem.* 2004, vol. 71, no. 1-2, p. 261-265.
- [34] BHATTACHARYA, A. Radiation and Industrial Polymers. *J. of Prog. Polym. Sci.* 2000, vol. 25, no. 3, p. 371-401.
- [35] BHATT, S., HOFFMAN, R. Outgassing Behavior of E Beam Irradiated HDPE and ETFE. *ANTEC 2006 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*. Brookfield: Society of Plastics Engineers, 2006, p. 1540-1543.
- [36] FEULNER, R. et al. The Effects of E-Beam Irradiation Induced Cross Linking on the Friction and Wear of Polyamide 66 in Sliding Contact. *J. of Wear.* 2010, vol. 268, no. 7-8, p. 905-910.
- [37] MACHI, S. Radiation Technology for Sustainable Development. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 1995, vol. 46, no. 4-6, p. 399-410.
- [38] AGUADO, J., SERRANO, D.P. *Feedstock Recycling of Plastic Wastes*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1999. 206 p. ISBN 978-0-85404-531-0
- [39] BURILLO, G. et al. Polymer Recycling: Potential Application of Radiation Technology. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2002, vol. 64, no. 1, p. 41-51.
- [40] EMSLEY, A., AZAPAGIC, A., HAMERTON, I., HAMERTON, I. *Polymers. The Environment and Sustainable Development*. West Sussex: John Wiley, 2003. 219 p. ISBN 978-0471877409
- [41] TOTH, K., CZVIKOVSKY, T., ABD-ELHAMID, M. Radiation-Assisted PET Recycling Using Glass Fiber Reinforcement and Reactive Additives. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2004, vol. 69, no. 2, p. 143-147.
- [42] CZVIKOVSKY, T., HARGITAI, H. Compatibilization of Recycled Polymers Through Radiation Treatment. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 1999, vol. 55, no. 5-6, p. 727-730.
- [43] CZVIKOVSKY, T., HARGITAI, H. Electron Beam Surface Modifications in Reinforcing and Recycling Polymers. *J. of Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B.* 1997, vol. 131, no. 1-4, p. 300-304.
- [44] MESZAROS, L., BARANY, T., CZVIKOVSKY, T. EB-Promoted Recycling of Waste Tire Rubber with Polyolefins. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2012, vol. 81, no. 9, p. 1357-1360.

- [45] BURILLO, G. et al. Compatibilization of Recycled and Virgin PET with Radiation-Oxidized HDPE. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2002, vol. 63, no. 3-6, p. 241-244.
- [46] ADEM, E. et al. Radiation Crosslinking of the Virgin and Recycled Low Density Polyethylene Blend. *J. of Mex. Chem. Soc.* 1999, Vol. 43, No. 6, p. 201-203.
- [47] ADEM, E. et al. Crosslinking of Recycled Polyethylene by Gamma and Electron Beam Irradiation. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 1998, vol. 52, no. 1-6, p. 171-176.
- [48] SUAREZ, J.C.M., MANO, E.B., PEREIRA, R.A. Thermal Behavior of Gamma-Irradiated Recycled Polyethylene Blends. *J. of Polym. Degrad. Stab.* 2000, vol. 69, no. 2, p. 217-222.
- [49] SUAREZ, J.C.M., MANO, E.B., BONELLI, C.M.C. Effects of Gamma-Irradiation on Mechanical Characteristics of Recycled Polyethylene Blends. *J. of Polym. Eng. Sci.* 1999, vol. 39, no. 8, p. 1398-1403.
- [50] FOJTL, L. Návrh Konstrukce Míchacího Zařízení. *Bakalářská práce.* Univerzita Tomáše Bati, Zlín, 2010. 68 s.
- [51] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998. 10 s. Třídící znak 64 0604.
- [52] ČSN EN ISO 179. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998. 18 s. Třídící znak 64 0612.
- [53] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – část 1: Základní principy.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997. 15 s. Třídící znak 64 0604.
- [54] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore).* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003. 12 s. Třídící znak 64 0624.
- [55] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002. 31s. Třídící znak 42 0378.
- [56] ČSN EN ISO 306. *Plasty – Termoplasty – Stanovení Teploty Měknutí dle Vicata (VST).* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12s. Třídící znak 64 0521.
- [57] ČSN EN ISO 1133. *Plasty – Stanovení Hmotnostního (MFR) a Objemového (MVR) Indexu Toku Taveniny Termoplastů.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000. 15s. Třídící znak 64 0861.

- [58] STANĚK, Michal, MAŇAS, David a Miroslav MAŇAS. *Stavebnicová testovací vstřikovací forma*. Česká republika. Užiténý vzor, CZ 23388. 2011-01-07.
- [59] HINDLS, R. *Statistika pro Ekonomy*. Praha: Professional Publishing, 2007. 415 s. ISBN 978-80-86946-43-6.
- [60] NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M., KRÍŽ, O. *Základy Statistiky: Aplikace v Technických a Ekonomických Oborech*. Praha: Grada, 2012. 236 s. ISBN 978-80-247-4273-1.
- [61] ŘEZÁNKOVÁ, H., LOSTER, T., *Základy Statistiky*. Praha: Oeconomica, 2013. 95 s. ISBN 978-80-245-1957-9.
- [62] MURPHY, J. *Additives for Plastics*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Elsevier, 2001. 484 p. ISBN 978-1-85617-370-4
- [63] HARPER, C.A., PETRIE E.M. *Plastics Materials and Processes*. A Concise Encyclopedia, Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 1008 p. ISBN 978-0-4714-5603-2
- [64] WYPYCH, G. *Handbook of Fillers*. 3<sup>rd</sup> ed. Toronto: ChemTech Publishing, 2010. 910 p. ISBN 978-1-895198-41-6
- [65] VASILE, C., KULSHRESHTHA, A.K. *Handbook of Polymer Blends*. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2002. 674 p. ISBN 978-1-85957-309-5
- [66] WHITE, J.L., KIM, K.J. *Thermoplastic and Rubber Compounds*. Technology and Physical Chemistry. Munich: Hanser, 2008. 301 p. ISBN 978-1-56990-407-7
- [67] FAN, Z.J., WILLIAMS, M.C., CHOI, P. A Molecular Dynamics Study of the Effects of Branching Characteristics of LDPE on its Miscibility with HDPE. *J. of Polymer*. 2002, vol. 43, no. 4, p. 1497-1502.
- [68] HAMEED, T., HUSSEIN, I.A. Effect of Short Chain Branching of LDPE on its Miscibility with Linear HDPE. *J. of Macromol. Mater. Eng.* 2004, vol. 289, no. 2, p. 198-203.
- [69] NWABUNMA, D., KYU, T. *Polyolefin Blends*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 688 p. ISBN 978-0-470-19897-1
- [70] CHEN, CH.CH. et al. An Investigation of Instability of Phase Morphology of Blends of Nylons with Polyethylenes and Polystyrenes and Effects of Compatibilizing Agents. *J. of Polym. Eng. Sci.* 1988, vol. 28, no. 2, p. 69-80.
- [71] SINGH, A. Irradiation of Polymer Blends Containing a Polyolefin. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2001, vol. 60, p. 453-459.
- [72] AKOVALI, G., TORUN, T.T., BAYRAMLI, E., ERINC, N.K. Mechanical Properties and Surface Energies of Low Density Polyethylene-Poly (Vinyl-Chloride) Blends. *Polym.* 1997, vol. 39, no. 6-7, p. 1363-1368.

- [73] LEGOCKA, I., ZIMEK, Z., MIRKOWSKI, K., NOWICKI, A. Preliminary Study on Application PE Filler Modified by Radiation. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2000, vol. 57, no. 3-6, p. 411-416.
- [74] ZENKIEWICZ, M. et al. Effects of Electron-Beam Irradation on Some Structural Properties of Granulated Polymer Blends. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 2008, vol. 77, no. 2, p. 146-153.
- [75] SPADARO G. et al. Physical and Structural Characterization of Blends Made with Polyamide 6 and Gamma-Irradiated Polyethylenes. *J. of Radiat. Phys. Chem.* 1996, vol. 48, no. 2, p. 207-216.
- [76] SPADARO G. et al. Molecular Modifications and Crystallization Relationships for Gamma-Irradiated LLDPE/PA6 Blends. *J. of Thermochemica Acta.* 1993, Vol. 227, p. 75-82.
- [77] BEDNARIK, M. et al. Strength of Bonded Joints at Elevated Temperatures after Radiation Cross-Linking. *Intl. J. of Mech.* 2014, vol. 8, p. 10-17.
- [78] HARPER, C.A. *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites.* 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1996. 884 p. ISBN 978-0-0713-8476-6
- [79] DOUFNOUNE, R., HADDAOUI, N., RIAHI, F. The Effects of Coupling Agents on the Mechanical, Rheological and Thermal Properties of Calcium Carbonate-Filled LDPE Compatibilized with Maleic Anhydride-g-LDPE (Part II). *Intl. J. of Polym. Mat.* 2008, vol. 57, no. 7, p. 690-708.
- [80] LANGMAIER, J. *Adhese a adhesiva.* Zlín: Ediční středisko FT VUT, 1999. 106 s. ISBN 80-214-1373-5

**SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA**

Časopisy evidované v databázi Web of Science k 7. 4. 2015

1. **J. Navratil**, M. Manas, A. Mizera, M. Bednarik, M. Stanek, M. Danek, „Recycling of Irradiated High-Density Polyethylene“, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 106, 2015, pp. 68-72, ISSN 0969-806X.

Časopisy evidované v databázi SCOPUS k 7. 4. 2015

2. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, M. Bednarik, A. Mizera, „Utilization of DMLS in Injection Mold Design“, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2011, pp. 1507-1508, ISSN 1726-9679.
3. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Tensile Toughness of Irradiated HDPE“, *International Journal of Mechanics*, Vol. 7, Issue 3, 2013, pp. 327-334, ISSN 1998-4448.
4. **J. Navratil**, M. Manas, M. Stanek, D. Manas, M. Ovsik, M. Bednarik, A. Mizera, „Hardness and Micro-Indentation Hardness Comparison of Recycled Modified HDPE“, *Key Engineering Materials*, Vol. 606, 2014, pp. 217-220, ISSN 1013-9826.
5. **J. Navratil**, M. Manas, M. Stanek, D. Manas, M. Bednarik, A. Mizera, T. Gavenda, „Utilization of Terahertz Spectroscopy for Optical Behavior Determination of Recycled Modified HDPE“, *Advanced Materials Research*, Vol. 1025-1026, 2014, pp. 547-550, ISSN 1022-6680.
6. M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, **J. Navratil**, V. Senkerik, „Injection Molding Process and Its Optimization“, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2011, pp. 155-156, ISSN 1726-9679.
7. K. Kyas, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, **J. Navratil**, V. Senkerik, „Influence of Runner System Design on Molding Process“, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2011, pp. 733-734, ISSN 1726-9679.
8. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Polymer Fluidity Influenced by the Percentage of Filler“, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 6, Issue 6, 2012, pp. 542-549, ISSN 1998-0159.
9. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Gate Location and Cooling System Optimization“, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 6, Issue 6, 2012, pp. 558-565, ISSN 1998-0159.
10. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, **J. Navratil**, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, „Comparison of Different Rapid Prototyping Methods“, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 6, Issue 6, 2012, pp. 550-557, ISSN 1998-0159.



11. K. Kyas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Manas, D. Manas, V. Senkerik, A. Skrobak, „Rubber Product Properties Influenced by Runners Trajectory”, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 7, Issue 1, 2013, pp. 1-8, ISSN 1998-0159.
12. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „How Amount of Talc Influence the Polymer Flow”, *International Journal of Mechanics*, Vol. 7, Issue 3, 2013, pp. 277-284, ISSN 1998-4448.
13. A. Mizera, M. Manas, Z. Holik, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Ovsik, M. Reznicek, „Properties of Irradiated PA12 by Accelerated Electrons”, *International Journal of Mechanics*, Vol. 7, Issue 4, 2013, pp. 435-442, ISSN 1998-4448.
14. A. Mizera, M. Manas, Z. Holik, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Ovsik, M. Reznicek, „Properties of Irradiated PA11 by Accelerated Electrons”, *International Journal of Mechanics*, Vol. 7, Issue 3, 2013, pp. 164-171, ISSN 1998-4448.
15. P. Kratky, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Ovsik, K. Kyas, **J. Navratil**, „Nanohardness of Electron Beam Irradiated PMMA”, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 7, Issue 12, 2013, pp. 957-964, ISSN 1998-0140.
16. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, M. Ovsik, **J. Navratil**, A. Mizera, „Surface and Adhesive Properties of Low-Density Polyethylene after Radiation Cross-Linking”, *Key Engineering Materials*, Vol. 606, 2014, pp. 265-268, ISSN 1013-9826.
17. D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Ovsik, M. Bednarik, A. Mizera, **J. Navratil**, „Micromechanical Properties of Surface Layer of HDPE Modified by Beta Irradiation“, *International Journal of Mechanics*, Vol. 8, Issue 1, 2014, pp. 150-157, ISSN 1998-4448.
18. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, **J. Navratil**, A. Skrobak, „SW and HW Optimization of Injection Molding Process”, *International Journal of Mechanics*, Vol. 8, Issue 1, 2014, pp. 85-92, ISSN 1998-4448.
19. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, Z. Holik, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Temperature Stability of Modified PBT by Radiation Cross-Linking“, *Advanced Materials Research*, Vol. 1025-1026, 2014, pp. 256-260, ISSN 1022-6680.
20. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, Z. Holik, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Tensile Behaviour of Modified PBT by Radiation Cross-Linking“, *Advanced Materials Research*, Vol. 1025-1026, 2014, pp. 261-264, ISSN 1022-6680.
21. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, A. Mizera, „Effect of Ionizing Beta Radiation on the Strength of Bonded Joints of Polycarbonate“, *Advanced Materials Research*, Vol. 1025-1026, 2014, pp. 251-255, ISSN 1022-6680.

22. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Comparison of Mechanical Properties of Different Particle Sizes of Recycled Polycarbonate at Higher Temperature“, *International Journal of Mechanics*, Vol. 8, Issue 1, 2014, pp. 268-275, ISSN 1998-4448.

Časopisy ostatní k 7. 4. 2015

23. **J. Navratil**, M. Stanek, S. Sanda, A. Mizera, M. Bednarik, K. Kyas, J. Cerny, „Cooling Systems Comparison“, *Plasty a Kaučuk*, Ročník 49, Číslo speciál, 2012, pp. 24-26, ISSN 0322-7340.
24. **J. Navratil**, M. Manas, M. Stanek, M. Bednarik, A. Mizera, K. Kyas, „Recyclation of Irradiated HDPE – Influence on Material Hardness“, *Chemické Listy*, Vol. 107, Issue s1, 2013, pp. 155-157, ISSN 0009-2770.
25. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Mechanical Properties of Recycled Irradiated HDPE“, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 8, 2014, pp. 108-115, ISSN 2074-1308.
26. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Recyclation of Modified HDPE“, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 8, 2014, pp. 33-40, ISSN 2074-1308.
27. **J. Navratil**, M. Manas, M. Stanek, D. Manas, M. Bednarik, A. Mizera, „Material Properties' Comparison of PA6/HDPE Blends“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 111-118, ISSN 2313-0555.
28. J. Cerny, Z. Holik, K. Kyas, **J. Navratil**, „Modern Methods of Design of Ergonomics Parts“, *Plasty a Kaučuk*, Ročník 49, Číslo speciál, 2012, pp. 6-8, ISSN 0322-7340.
29. A. Mizera, M. Manas, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Temperature Stability of Radiation Cross-Linked Polyethylenes“, *Plasty a Kaučuk*, Ročník 49, Číslo speciál, 2012, pp. 21-23, ISSN 0322-7340.
30. K. Kyas, V. Pata, M. Stanek, M. Bednarik, A. Mizera, **J. Navratil**, „Temperature Influence of Rubber Testing Samples during Its Preparation“, *Chemické Listy*, Vol. 107, Issue s1, 2013, pp. 59-61, ISSN 0009-2770.
31. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, **J. Navratil**, M. Ovsik, K. Kyas, A. Mizera, „Strength of Bonded Joints of LDPE after Surface Treatment Beta Radiation“, *Chemické Listy*, Vol. 107, Issue s1, 2013, pp. 103-105, ISSN 0009-2770.
32. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, M. Danek, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Properties of LDPE after Radiation Cross-Linking“, *Chemické Listy*, Vol. 107, Issue s1, 2013, pp. 150-152, ISSN 0009-2770.
33. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Temperature Stability of Modified TPE-E by Radiation Cross-Linking“, *Chemické Listy*, Vol. 107, Issue s1, 2013, pp. 152-155, ISSN 0009-2770.

34. K. Kyas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Manas, D. Manas, A. Mizera, A. Skrobak, „Effect of Index of Non-Newtonian Behavior on Curing Rate during Injection Molding of Rubber Compound“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 17-24, ISSN 2313-0555.
35. A. Mizera, M. Manas, Z. Holik, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, M. Reznicek, „Comparison of Properties between Irradiated PA11 and PA12 by Accelerated Electrons“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 1-8, ISSN 2313-0555.
36. A. Mizera, **J. Navratil**, M. Manas, D. Manas, M. Stanek, M. Bednarik, M. Reznicek, „Properties of LDPE with the Filler of Recycled Irradiated HDPE by Accelerated Electrons“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 25-32, ISSN 2313-0555.
37. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Injection Molding of Rubber Compound Influenced by Surface Roughness“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 41-48, ISSN 2313-0555.
38. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Influence of Type and Amount of Recycled Material to Mechanical Properties of PC“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 71-78, ISSN 2313-0555.
39. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, A. Mizera, „Influence of Ionizing Beta Radiation on the Adhesion Properties and Strength of Bonded Joint of Linear Low Density Polyethylene“, *International Journal of Materials*, Vol. 1, 2014, pp. 126-133, ISSN 2313-0555.
40. A. Mizera, M. Manas, Z. Holik, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Temperature Stability Comparison of Commodity and Engineering Thermoplastics after Radiation Cross-Linking“, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 8, 2014, pp. 260-267, ISSN 2074-1308.
41. P. Kratky, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Ovsik, V. Senkerik, **J. Navratil**, „Influence of Irradiation on Mechanical Properties of PMMA“, *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, Vol. 8, 2014, pp. 93-101, ISSN 2074-1278.

*Konference mezinárodní k 7. 4. 2015*

42. **J. Navratil**, M. Stanek, S. Sanda, M. Manas, D. Manas, A. Mizera, M. Bednarik, „Utilization of Direct Metal Laser Sintering in Injection Mold Design“, In: *Recent Researches in Circuits and Systems – Proceedings of the 16<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, Kos Island: WSEAS Press, 2012, pp. 273-278, ISBN 978-1-61804-108-1, ISSN 1790-5117.

43. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Recyclation of Irradiated HDPE – Influence on Impact Toughness, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 111-114, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
44. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Tensile Behavior of Recycled Irradiated HDPE“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 115-118, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
45. **J. Navratil**, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, K. Kyas, A. Skrobak, V. Senkerik, „Recyclation of Irradiated HDPE – Influence on Tensile Toughness“, In: *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Rhodes Island: WSEAS Press, 2013, pp. 186-189, ISBN 978-960-474-314-8, ISSN 1790-5117.
46. **J. Navratil**, M. Manas, M. Stanek, D. Manas, M. Bednarik, A. Mizera, „Physical Properties’ Determination of PA6/HDPEx Blends“, In: *Latest Trends on Systems – Proceedings of the 18th International Conference on Systems*, Santorini Island: WSEAS Press, 2014, pp. 268-272, ISBN 978-1-61804-243-9, ISSN 1790-5117.
47. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Fluidity of Polymer Influenced by the Amount of Filler“, In: *Recent Researches in Circuits and Systems – Proceedings of the 16<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, Kos Island: WSEAS Press, 2012, pp. 264-268, ISBN 978-1-61804-108-1, ISSN 1790-5117.
48. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, **J. Navratil**, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, „Rapid Prototyping Methods Comparison“, In: *Recent Researches in Circuits and Systems – Proceedings of the 16<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, Kos Island: WSEAS Press, 2012, pp. 269-272, ISBN 978-1-61804-108-1, ISSN 1790-5117.
49. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Optimization of Gate Location and Cooling System“, In: *Recent Researches in Circuits and Systems – Proceedings of the 16<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, Kos Island: WSEAS Press, 2012, pp. 294-298, ISBN 978-1-61804-108-1, ISSN 1790-5117.
50. K. Kyas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Manas, D. Manas, V. Senkerik, A. Skrobak, „Influence of Runner Trajectory on Rubber Product Properties“, In: *Recent Researches in Circuits and Systems – Proceedings of the 16<sup>th</sup>*

- WSEAS International Conference on Circuits/Systems*, Kos Island: WSEAS Press, 2012, pp. 317-320, ISBN 978-1-61804-108-1, ISSN 1790-5117.
51. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Rubber Injection Molding Influenced by Mold Surface Roughness“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 103-106, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
  52. K. Kyas, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, V. Senkerik, „Effect on Non-Newtonian Behavior of Rubber Compound on Curing Rate“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 107-110, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
  53. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, M. Reznicek, „Comparison of PA11 and PA12 Properties after Radiation Crosslinking“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 119-122, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
  54. A. Mizera, **J. Navratil**, M. Manas, D. Manas, M. Stanek, M. Bednarik, M. Reznicek, „Properties of LDPE with the Filler of Recycled Irradiated HDPE“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 123-126, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
  55. P. Kratky, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Ovsik, K. Kyas, **J. Navratil**, „Nanohardness of Polymers (Polymethyl Methacrylate)“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 140-144, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
  56. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, K. Kyas, „Effect or Preparation of Recycled Material to Mechanical Properties of PC“, In: *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Information and of the 13<sup>th</sup> International Conference on*

- Applied Informatics and Communications*, Valencia: WSEAS Press, 2013, pp. 154-158, ISBN 978-960-474-316-2, ISSN 1790-5117.
57. M. Stanek, D. Manas, M. Manas, K. Kyas, V. Senkerik, A. Skrobak, **J. Navratil**, „Polymer Fluidity Influenced by Amount of Talc“, In: *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Rhodes Island: WSEAS Press, 2013, pp. 181-185, ISBN 978-960-474-314-8, ISSN 1790-5117.
58. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Ovsik, M. Reznicek, „Properties of PA11 after Radiation Cross-Linking“, In: *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Rhodes Island: WSEAS Press, 2013, pp. 201-204, ISBN 978-960-474-314-8, ISSN 1790-5117.
59. A. Mizera, M. Manas, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Ovsik, M. Reznicek, „Properties of PA12 after Radiation Cross-Linking“, In: *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Rhodes Island: WSEAS Press, 2013, pp. 209-212, ISBN 978-960-474-314-8, ISSN 1790-5117.
60. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, M. Reznicek, „Influence of Temperature and Amount of Recycled Material to PC Properties“, In: *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Rhodes Island: WSEAS Press, 2013, pp. 235-238, ISBN 978-960-474-314-8, ISSN 1790-5117.
61. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, A. Mizera, „The Surface Properties of Linear Low-Density Polyethylene After Radiation Cross-Linking“, In: *Latest Trends on Systems – Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Santorini Island: WSEAS Press, 2014, pp. 123-126, ISBN 978-1-61804-243-9, ISSN 1790-5117.
62. A. Mizera, M. Manas, Z. Holik, D. Manas, M. Stanek, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Temperature Stability of Construction Polymers after Radiation Cross-Linking“, In: *Latest Trends on Systems – Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Santorini Island: WSEAS Press, 2014, pp. 243-246, ISBN 978-1-61804-243-9, ISSN 1790-5117.
63. P. Kratky, D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Ovsik, V. Senkerik, **J. Navratil**, „Impact of Irradiation Dose on Mechanical Properties of PMMA“, In: *Latest Trends on Systems – Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Systems*, Santorini Island: WSEAS Press, 2014, pp. 290-295, ISBN 978-1-61804-243-9, ISSN 1790-5117.
64. V. Senkerik, M. Stanek, M. Manas, D. Manas, A. Skrobak, **J. Navratil**, „The Behaviour of Recycled Material with Particles of Various Sizes at Increased Temperature and Their Tensile Properties“, In: *Latest Trends*

*on Systems – Proceedings of the 18th International Conference on Systems*, Santorini Island: WSEAS Press, 2014, pp. 302-305, ISBN 978-1-61804-243-9, ISSN 1790-5117.

*Konference národní k 7. 4. 2015*

65. A. Mizera, M. Manas, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Teplotní odolnost radiálně síťovaných termoplastických polymerů“, In: *Plastko*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012, pp. 244-247, ISBN 978-80-7454-137-7.
66. M. Bednarik, D. Manas, M. Manas, A. Mizera, **J. Navratil**, „Vliv ionizačního záření na pevnost lepených spojů“, In: *Plastko*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012, pp. 248-252, ISBN 978-80-7454-137-7.
67. A. Mizera, M. Manas, **J. Navratil**, M. Bednarik, „Study of Polymers Temperature Stability“, In: *8<sup>th</sup> Annual International Bata Conference for Ph.D. Students and Young Researchers*, 2012, ISBN 978-80-7454-013-4.

**CV AUTORA**

**Jméno a příjmení, titul** Jan Navrátil, Ing.  
**Adresa** Provodov 66, 763 45 Březůvky, Česká Republika  
**Email** j1navratil@ft.utb.cz

**Vzdělání:**

**2002 – 2006** Integrovaná střední škola technická, Zlín  
Obor: Mechanik seřizovač  
**2006 – 2009** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Obor: Procesní inženýrství – Bc.  
**2009 – 2011** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Obor: Konstrukce technologických zařízení – Ing.  
**2011 – dosud** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Obor: Nástroje a procesy – Ph.D.

**Pracovní zkušenosti:**

**13/06/11 – 31/07/11** EC Engineering Sp. z o.o., Krakow, Polsko  
Pozice: stážista  
Náplň práce: tvorba výkresové dokumentace  
**03/07/12 – 27/08/12** Polytechnická Univerzita Hong Kong, Hong Kong  
Pozice: stážista  
Náplň práce: tvorba e-learningových materiálů  
**06/11/12 – 30/04/15** IAESTE UTB Zlín  
Pozice: koordinátor zahraničních výměn  
Náplň práce: koordinace zahraničních výměn  
**16/01/13 – 08/02/13** Robert Bosch, spol. s.r.o., České Budějovice  
Pozice: stážista  
Náplň práce: tvorba podkladů k stick-slip efektu  
**30/05/14 – 05/06/14** 54. Filmový festival pro děti a mládež ve Zlíně  
Pozice: delegát zahraničních hostů  
Náplň práce: asistování zahraničním hostům  
**30/06/14 – 19/09/14** Xingyu Automotive Lighting Systems Co., Ltd., Čína  
Pozice: stážista  
Náplň práce: podpurná činnost na odd. materiálů

**Doplňující informace o vzdělání:**

Bakalářská práce oceněna firmou Hella Autotechnik spol, s.r.o.  
Diplomová práce oceněna děkanem Fakulty technologické  
Inženýrský titul s vyznamenáním  
1. místo v soutěži SVOČ 2014



# PŘÍLOHA A: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE

TWO COLOURS



ONE DIRECTION

Polyethylene

**TIPELIN 6300B**

Bimodal HDPE for blow moulding

## Description

**TIPELIN 6300B** is a high density bimodal polyethylene copolymer (with butene-1 as comonomer) intended for blow moulding of products with high stiffness and excellent environmental stress crack resistance (ESCR). The grade contains antioxidant and acid scavenger.

## Applications

**TIPELIN 6300B** is recommended for bottles and containers up to 10 litre capacity for detergents, household chemicals and for blow moulded products for packaging of aggressive industrial chemicals bounded to UN certificates. It is suitable for corrugated pipes too.

**TIPELIN 6300B** is suitable for food contact and for manufacturing of pharmaceutical packing products. The product complies with Food Contact and Pharmaceutical Regulations.

## Properties

	Test method	Unit	Typical value
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190 °C /2.16 kg)	ISO 1133	g/10 min	0.30
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190 °C /5.0 kg)	ISO 1133	g/10 min	1.3
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190 °C /21.6 kg)	ISO 1133	g/10 min	30
Density (23 °C) *	ISO 1183-2	kg/m <sup>3</sup>	954
Tensile Strength at Yield *	ISO 527-3	MPa	29
Tensile Strain at Yield *	ISO 527-3	%	11
Tensile Strain at Break *	ISO 527-3	%	1250
Flexural Modulus *	ISO 178	MPa	1550
IZOD Impact Strength (notched, 23 °C) *	ISO 180/ A	kJ/m <sup>2</sup>	9
Vicat Softening Temperature *	ISO 306/A 120	°C	126
Shore D Hardness *	ISO 868	-	65
ESCR F50 B (10% Igepal CO-630) *	ASTM D 1693	h	700
OIT (200 °C) *	EN 728	min	26

Typical properties, not to be used as specification.

\*Average mechanical property values of several measurements carried out on standard pressed specimens (ISO 293) conditioned at room temperature (ISO 291).

Technical Data Sheet

**TIPELIN TIPOLEN TIPLLEN TATREN BRALEN**

The joint product portfolio of TVK and Slovnaft Petrochemicals provide infinite opportunities

**MEMBERS OF THE MOL GROUP**

**Slovnaft**  
 PETROCHEMICALS


# PŘÍLOHA B: MATERIÁLOVÝ LIST LDPE

## Technical Information



### DOW LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin

**Overview** LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin can be readily processed using conventional injection moulding techniques utilising melt temperatures between 140 and 250°C, a mould temperature between 10 and 50°C, and injection pressure between 50 and 150 MPa.

When properly injection moulded, 780E Low Density Polyethylene Resin exhibit:

- Excellent flow
- Good rigidity
- Good surface gloss

Note: LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin should comply with FDA regulation 177.1520 and with most European food contact regulations when used unmodified and processed according to good manufacturing practices for contact applications. Please, contact your nearest Dow office for food contact compliance statements. The purchaser remains responsible for determining whether the use complies with all relevant regulations.

Applications:

- Housewares.
- Toys & leisures.
- Containers.
- Compounding.

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.923 g/cm <sup>3</sup>	0.923 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/2.16 kg)	20 g/10 min	20 g/10 min	ISO 1133
Molding Shrinkage			ASTM D955
Flow	0.023 in/in	2.3 %	
Across Flow	0.015 in/in	1.5 %	
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
Compression Molded	1.40 hr	1.40 hr	
Spiral Flow Length			Dow Method
600 bar	1.9 in	4.90 cm	
1200 bar	3.3 in	8.50 cm	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	23800 psi	164 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress			ISO 527-2
Yield, Compression Molded	1190 psi	8.20 MPa	
Break, Compression Molded	1520 psi	10.5 MPa	
Tensile Strain (Break, Compression Molded)	50 %	50 %	ISO 527-2
Films	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Elongation			ASTM D882
MD: Break, 7.87 mil (200 µm)	700 %	700 %	
TD: Break, 7.87 mil (200 µm)	750 %	750 %	
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Impact Strength	136 ft·lb/in <sup>2</sup>	286 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 8256
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D)	49	49	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	199 °F	93.0 °C	ASTM D1525

### Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

# PŘÍLOHA C: TOKOVÁ KŘIVKA LDPE A HDPE

