

Optimalizace struktury směsí biodegradovatelných polymerů

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Roman Baše

Vedoucí práce:

Ing. Martin Borůvka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Optimalizace struktury směsí biodegradovatelných polymerů

Jméno a příjmení: **Roman Baše**
Osobní číslo: S18000013
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Výběr vhodných biodegradovatelných polymerů a metody jejich zpracování.
3. Příprava zkušebních těles.
4. Studium morfologie a hodnocení mechanických vlastností.
5. Zhodnocení a diskuse dosažených výsledků.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 30 str.
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Wang, Ming, et al. Progress in toughening poly (lactic acid) with renewable polymers. *Polymer Reviews* 57.4 (2017): 557-593.
- [2] Nagarajan, Vidhya, Amar K. Mohanty, and Manjusri Misra. Perspective on polylactic acid (PLA) based sustainable materials for durable applications: Focus on toughness and heat resistance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 4.6 (2016): 2899-2916.
- [3] Di Lorenzo, Maria Laura, and René Androsch, eds. *Synthesis, Structure and Properties of Poly (lactic acid)*. Springer International Publishing, 2018.
- [4] Mittal, Vikas, ed. *Functional polymer blends: synthesis, properties, and performance*. CRC Press, 2012.

Vedoucí práce: Ing. Martin Borůvka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. července 2021

Roman Baše

Název bakalářské práce

Optimalizace struktury směsí biodegradovatelných polymerů

Anotace

Cílem této bakalářské práce byla optimalizace směsí biodegradovatelných polymerů. Optimalizace byla provedena pro směs kyseliny poly(L-mléčné) (PLLA) s biodegradovatelným termoplastickým elastomerem na bázi polyesteru (TPE-E) v různém procentuálním poměru a také s přidáním kompatibilizátoru poly(ethylen–methylakrylát–glycidyl–methakrylát) (EMA-GMA). V rámci experimentální studie byly zhotoveny zkušební vzorky, u nichž se následně testovaly a zkoumaly jejich tahové vlastnosti, rázová a vrubová houževnatost a morfologie lomových ploch.

Klíčová slova:

biopolymery, biodegradace, kyselina polymléčná, termoplastický elastomer, směsi

Title of bachelor thesis

Structure optimization of biodegradable polymer blends

Annotation

The aim of this bachelor thesis was optimization of biodegradable polymer blends. Optimization was carried out for the blend poly(L-lactide) acid (PLLA) with biodegradable thermoplastic elastomer based on polyester (TPE-E) in different percentages and also with the addition of additive poly(ethylene-co-methyl acrylate-co-glycidyl methacrylate) (EMA-GMA). In experimental study, test specimens were subsequently tested and examined for their tensile properties, impact and notched toughness and fracture surface morphology.

Key words:

biopolymers, biodegradable, polylactide acid, thermoplastic elastomer, blends

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Borůvkovi, Ph D. za rady, ochotu, odbornou pomoc a za velké množství trpělivosti. Také chci poděkovat Ing. Luboši Běhálkovi, Ph D. za rady při průběhu experimentální části.

Nakonec bych chtěl také poděkovat přátelům a rodině, která mě ve studiu vždy podporovala a stále podporuje.

Roman Baše

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	11
2 Teoretická část	12
2.1 Polymery	12
2.2 Dělení polymerů.....	12
2.3 Biopolymery.....	13
2.3.1 Rozdělení biopolymerů	13
2.3.2 Budoucnost biopolymerů	14
2.4 Kyselina polymléčná (PLA).....	15
2.4.1 Výroba kyseliny polymléčné (PLA)	16
2.4.2 Výhody a nevýhody PLA.....	17
2.4.3 Využití PLA	18
2.5 Termoplastické elastomery (TPE)	19
2.6 Směsi	22
2.6.1 Příprava a zpracování polymerních směsí	23
3 Experimentální část.....	25
3.1 Materiály	25
3.2 Složení směsí.....	25
3.3 Proces výroby zkušebních těles	26
3.4 Průběh měření	27
3.4.1 Tahová zkouška	27
3.5 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti	28
3.6 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) – analýza	30
3.7 Vyhodnocení a diskuse výsledků	32
3.7.1 Tahová zkouška	32
3.7.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti	34
3.7.3 Skenovací elektronová mikroskopie	36
4 Závěr	46
Seznam literatury	47
Seznam příloh	50

Seznam použitých zkratk a symbolů

a_{cN}	[kJ/m ²]	Vrubová houževnatost
a_{cU}	[kJ/m ²]	Rázová houževnatost
b	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
E_c	[J]	Energie spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa
E_t	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
h	[mm]	Tloušťka zkušebního tělesa
ROP		Polymerace s otevřením kruhu
s		Směrodatná odchylka
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tání
ε_{tb}	[%]	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
ABS		Akrylonitril-butadien-styren
EMA-GMA, EMA		Poly(ethylen–methylakrylát–glycidyl–methakrylát)
EPDM		Ethylen-propylen-dien
LA		Kyselina mléčná
PBAT		Polybutylen adipát tereftalát
PBS		Polybutylen sukcinát
PCL		Polykaprolakton
PDLA		Kyselina poly D- mléčná
PDLLA		Kyselina poly DL- mléčná
PE		Polyethylen
PET		Polyethylentereftalát
PHA		Polyhydroxyalkanoát
PLA		Kyselina polymléčná
PLLA		Kyselina poly L- mléčná
PP		Polypropylen
PS		Polystyren

SBS	Poly (styren – butadien – styren)
SEBS	Poly (styren – ethylen – butylen – styren)
TPE	Termoplastický elastomer
TPE – V, TPV	Vulkanizovaný termoplastický elastomer
TPE–A, PEBA	Termoplastický elastomer na bázi amidů
TPE–E, TPE–ET	Termoplastický elastomer na bázi polyesteru
TPE–O, TPO	Termoplastický elastomer na bázi olefinů
TPE–S	Termoplastický elastomer na bázi styrenů
TPE–U, TPU	Termoplastický polyuretan

1 Úvod

Je známo, že znečištění plasty a plastovým odpadem je velkým ekologickým problémem, z toho důvodu by mělo být prioritou jeho snižování. Z hlediska udržitelného vývoje je nutné postupně zvyšovat využití materiálů, které jsou založeny na obnovitelných zdrojích. Evropská komise proto v roce 2018 zveřejnila evropskou strategii pro plasty v oběhovém hospodářství. Strategie obsahuje závazek EU omezit plastový odpad, zajistit, aby plastové výrobky byly navrhovány tak, aby mohly být recyklovány [1]. Avšak je zde problém v podobě nedostatečných mechanických vlastností těchto polymerů v porovnání s plasty na fosilním základě. Jedním z nejpoužívanějších a nejprogresivnějších biopolymerů je kyselina polymlečná (PLA). Jejím hlavním nedostatkem je nízká odolnost rázovému namáhání a vysokým teplotám. S cílem eliminovat tyto nežádoucí vlastnosti, se současný výzkum zaměřuje na modifikaci PLA pro zvýšení jejího aplikačního potenciálu. Jednou z možností jak zlepšit vlastnosti PLA je směšování s ostatními biodegradovatelnými polymery, které nebudou kompromitovat jeho kompostovatelnost. Biodegradovatelné termoplastické elastomery mohou díky optimalizaci struktury zlepšit rázovou odolnost a tažnost těchto materiálových systémů.

Na základě výše zmíněných problémů je cílem této práce vytvořit materiálové systémy s optimalizovanou strukturou, které budou schopné svými vlastnostmi konkurovat komoditním syntetickým polymerům a na konci své životnosti budou biologicky rozložitelné.

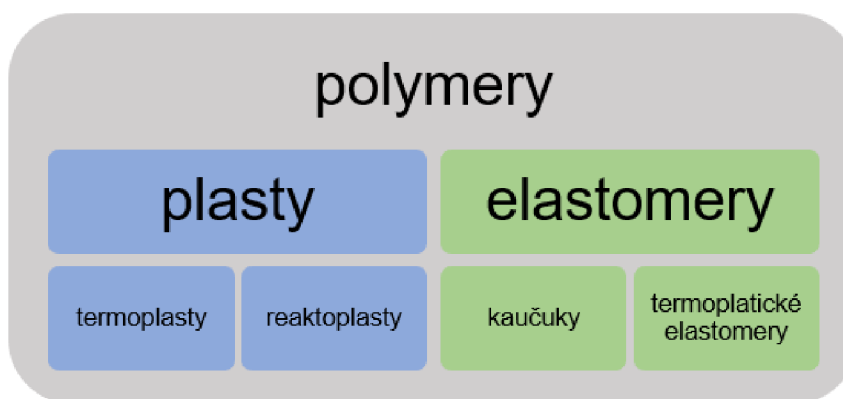
2 Teoretická část

2.1 Polymery

Polymery jsou makromolekulární látky přírodního nebo syntetického původu, které se skládají převážně z atomů uhlíku, vodíku, kyslíku a dalších prvků (dusíku, chlóru, aj.). Výrobky z polymerů se nachází převážně v pevném a tuhém stavu, při jejich zpracování jsou roztaveny a přecházejí do kapalného stavu nejčastěji za použití vyšších teplot a tlaků, při kterých jsou tvarovány do požadované formy, která je shodná s tvarem konečného výrobku [2, 3].

2.2 Dělení polymerů

Vzhledem k tomu, že mají polymery velice rozdílné vlastnosti, strukturu, chemické složení a původ, nemohou být rozděleny pouze dle jednoho kritéria. Jedno ze základních rozdělení polymerů, jak je možné vidět na *obr. 2.1*, je dle jejich mechanických vlastností a chování při zvýšené teplotě [4].



Obr. 2.1 Základní rozdělení polymerů [3]

Dle efektu působení vnějšího namáhání dělíme polymery na plasty a elastomery. U plastů, vzniká při působení vnějšího namáhání převážně plastická deformace (trvalá). Elastomery jsou vysoce pružné materiály s nízkou tuhostí, u kterých lze malou silou vyvolat značnou elastickou deformaci (vratná), jejich typickými představiteli jsou kaučuky, z nichž se vulkanizací vyrábí pryže [3].

Plasty jsou polymery, které jsou za běžných podmínek tvrdé a často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými (proto se nazývají plasty) a tvarovatelnými. Ty, u kterých je tato změna z plastického stavu do tuhého vratná nazýváme termoplasty. Pokud je tato změna nevratná, potom se jedná o tzv. reaktoplasty [5].

Elastomery jsou vysoce elastické materiály s malou tuhostí, které mohou být malou silou značně deformovány bez porušení [3].

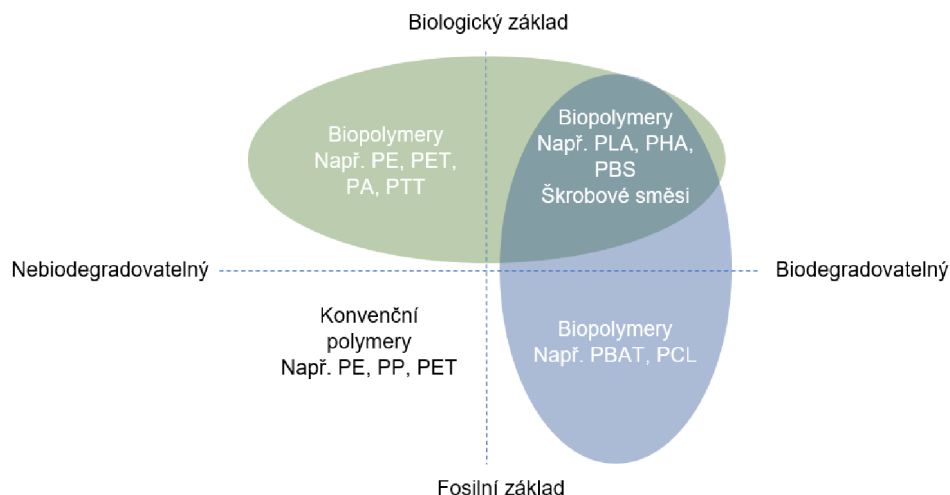
2.3 Biopolymery

Biopolymery nejsou jen jeden jediný materiál, ale skládají se z velkého množství polymerů s různými vlastnostmi a aplikacemi. První synteticky zpracované polymerní materiály byly založené na modifikovaných přírodních materiálech, jako jsou například šelak (pryskyřice), celulóza, latex, atd. Přírodní, na obnovitelných zdrojích založené, biopolymerní materiály jsou v podstatě staré jako sám život. V současnosti prošly bioplasty pozoruhodným „vzkříšením“, které je zapříčiněno ekologickými problémy a omezeným množstvím petrochemickým zdrojů. Dnes je v nabídce velmi široká paleta zajímavých typů bioplastů, které byly vyvinuty v několika posledních dekadách [6].

2.3.1 Rozdělení biopolymerů

Polymerní materiál můžeme nazývat bioplastem, pokud je buď na biologickém základě (z obnovitelných surovin), je biologicky odbouratelný (biodegradovatelný) nebo obojí. *Biologický základ* (angl. „bio-based“) znamená, že materiál pochází z biomasy. Pro výrobu bioplastů se nejčastěji používá biomasa, která pochází z kukuřice, cukrové třtiny nebo celulózy. *Biologicky odbouratelné* materiály jsou chemickým procesem, za působení mikroorganismů přeměňovány materiály na přírodní látky, jako je například voda, oxid uhličitý a humus. Proces biodegradace je závislý na okolních podmínkách (přístup vzduchu, vlhkost a teplota), na materiálu a na aplikaci [7].

Schopnost podléhat biodegradaci nezávisí na původu materiálu, ale spíše souvisí s jeho chemickou strukturou. Tudiž plasty, které jsou složeny, 100% z obnovitelných biologických surovin, mohou být biologicky nerozložitelné a naopak plasty založené 100% na fosilním základu mohou být biologicky rozložitelné [7]. Mezi materiály, které jsou celé nebo částečně na biologickém základě a které nejsou biologicky rozložitelné patří například bio: polypropylen (PP), polyethylen (PE) nebo polyethyltereftalát (PET). Materiály, které jsou na biologickém základě a zároveň biologicky rozložitelné jsou například kyselina polyléčná (PLA), polyhydroxyalkanoát (PHA) nebo polybutylen sukcinát (PBS). Poslední skupina je založena na fosilních zdrojích a materiály jsou zároveň biologicky rozložitelné, mezi ně patří například polybutylen adipát tereftalát (PBAT) nebo polykaprolakton (PCL) [8]. Rozdělení bioplastů do těchto skupin je názorně zobrazeno na *obr. 2.2*.

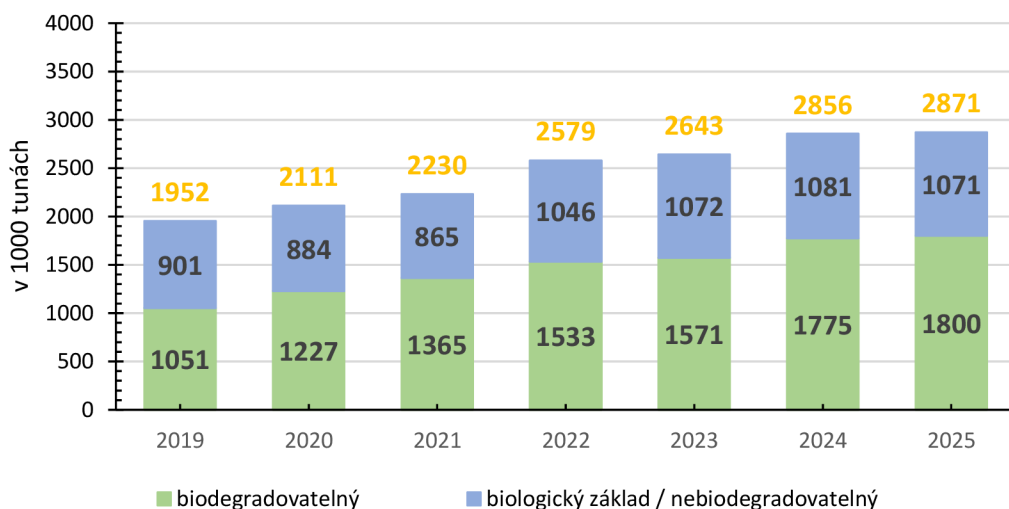


Obr. 2.2 Rozdělení biopolymerů [8]

2.3.2 Budoucnost biopolymerů

Vysoké povědomí o otázkách životního prostředí a negativních účincích fosilních zdrojů dává prostor pro rozvoj a využití biologicky odbouratelných polymerů. V současnosti bioplasty přibližně jedno procento z více než 368 milionů tun ročně vyrobených plastů. Biologicky rozložitelné plasty, mezi které patří PLA, PHA, škrobové směsi a další, představují téměř 60 procent celosvětové výroby bioplastů (což je více než 1,2 milionů tun ročně) [9]. Na obr. 2.3 lze vidět nárůst výroby biopolymerů z roku 2019 do roku 2020.

Bioplasty na bázi biomasy mají dvě důležité výhody. První z výhod je, že šetří fosilní zdroje, díky využití biomasy, která se každoročně obnovuje. Druhou výhodou je biologická odbouratelnost určitých typů bioplastů, která nabízí materiální obnovu na konci životnosti produktu [7].

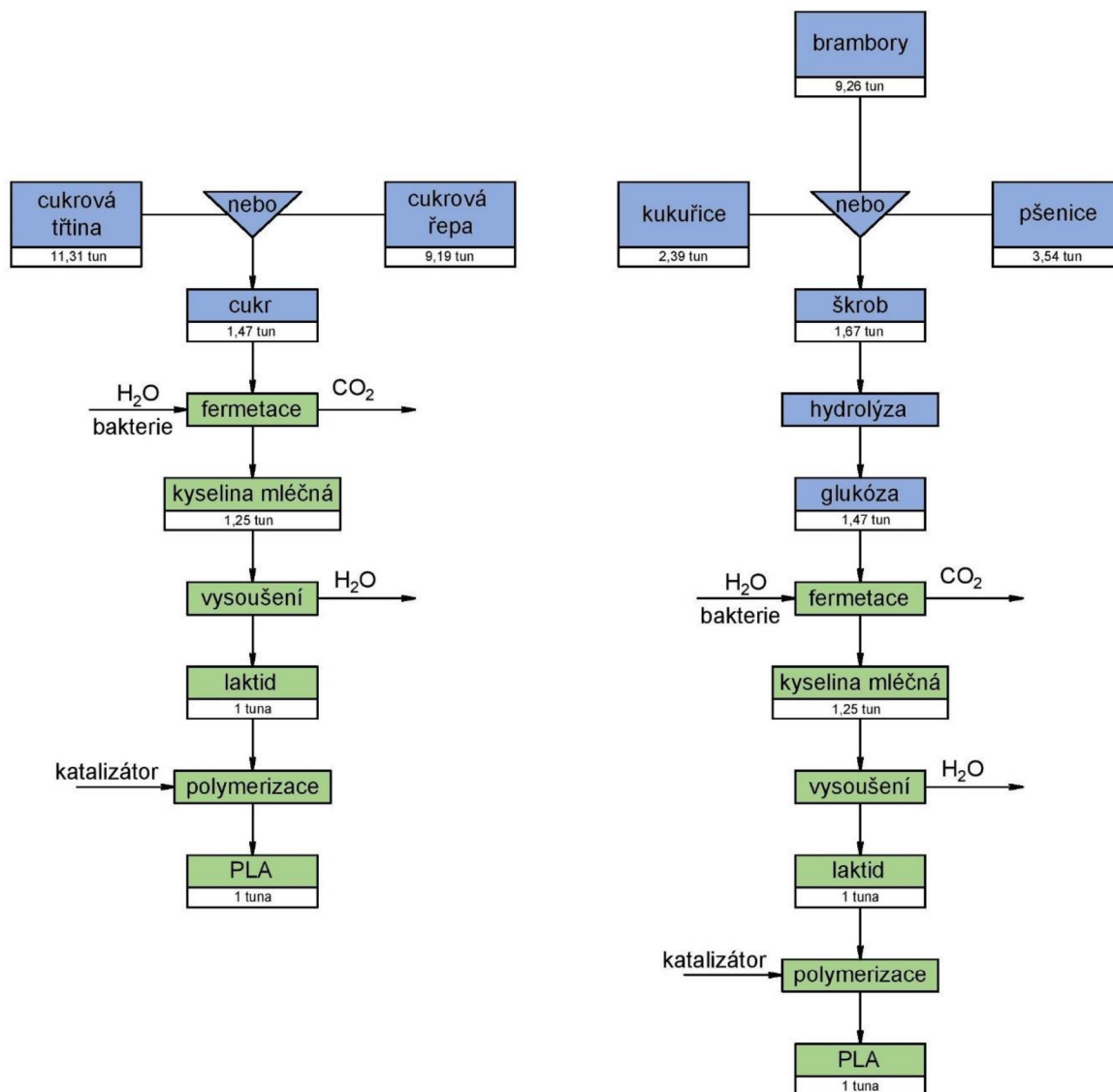


Obr. 2.3 Vývoj výroby biopolymerů v letech 2019/20 a predikce výroby v následujících letech [9]

2.4 Kyselina polymléčná (PLA)

Kyselina polymléčná se vyrábí z kyseliny mléčné (LA), je biologicky rozložitelná a má podobné vlastnosti jako PET nebo polystyren (PS) [10, 11]. Kyselina je při nízké krystalinitě transparentní, s jejím zvyšováním však dochází k poklesu transparentnosti. PLA má vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost v tahu, avšak s těmito vlastnostmi souvisí také křehkost, nízká tažnost a houževnatost [12]. Základním stavebním prvkem (monomerem) PLA je kyselina mléčná, která se vyrábí převážně biochemickou (fermentační) nebo syntetickou cestou (tato varianta se v současnosti nepoužívá pro výrobu PLA). Při obou metodách vzniká vedlejší produkt, biochemickou cestou vzniká sádrovec a při syntetické cestě jím je amonná sůl [13, 14]. Kyselina mléčná má chemický vzorec $HOCH_2CHCOOH$ a je to molekula, která existuje ve dvou enantiomerních formách (chirální molekuly se vzájemnými zrcadlovými obrazy [15]), kyselina „L“ mléčná a kyselina „D“ mléčná, které se od sebe liší účinkem na polarizované světlo [16]. Enantiomerní polymer, který se skládá pouze z L- nebo D-enantiomerů je nazýván poly kyselina L mléčná (PLLA) a poly kyselina D mléčná (PDLA). Optická čistota má vliv na fyzikální vlastnosti výsledných PLA produktů, jako je teplota tání a stupeň krystalinity. Vysoké čistoty (99,5 % jednoho izomeru) lze dosáhnout pouze biochemickou výrobou. PLA obsahující určitý poměr obou enantiomerů se nazývá poly kyselina-DL mléčná (PDLLA) [17, 18].

Biochemická výroba využívá jako vstupní suroviny obnovitelné zdroje, jako je kukuřice, brambory, cukrová třtina, aj. Fermentačním procesem se cukernaté jednotky (monosacharidy, disacharidy) obsažené ve vstupních surovinách enzymaticky štěpí a jsou bakteriemi transformovány na LA. Cukry na bázi polysacharidů, jako je celulóza nebo škrob, nejsou bakterie schopny snadno rozložit, proto se nejdříve štěpí na glukózu ještě před začátkem fermentace (*viz obr. 2.4*) [14].



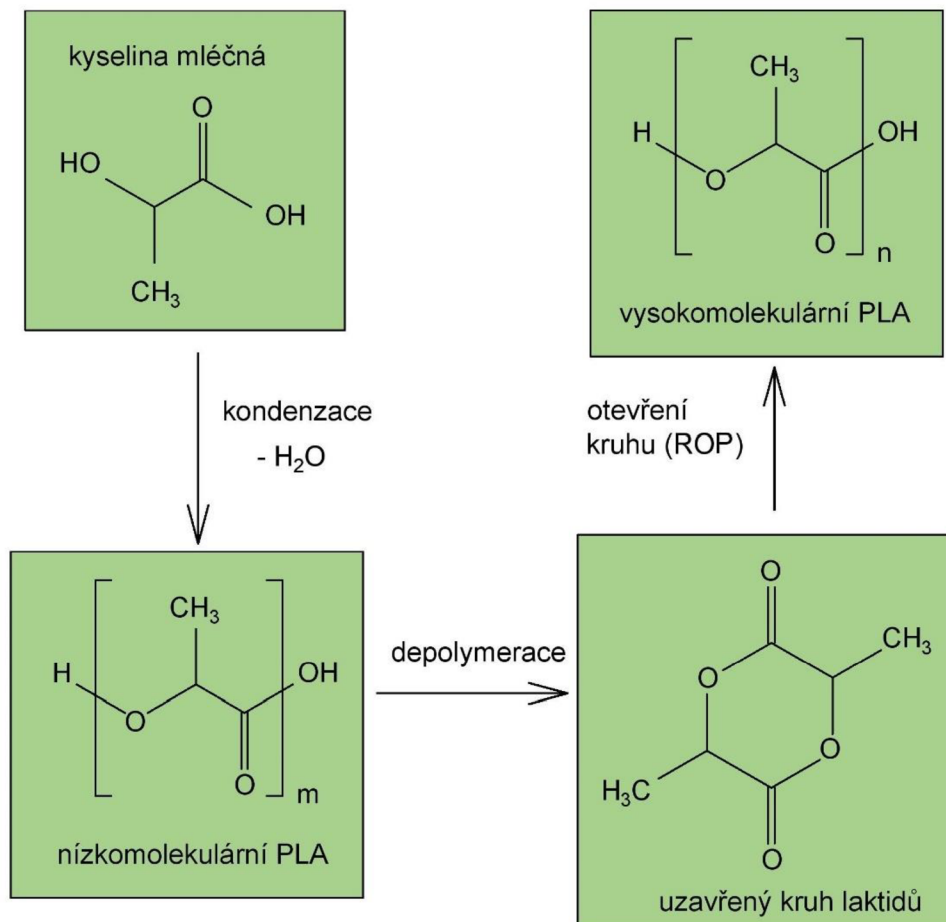
Obr. 2.4 Výroba z cukernatých plodin (vlevo) a výroba z plodin bohatých na škrob (vpravo) [6]

2.4.1 Výroba kyseliny polymléčné (PLA)

PLA může být syntetizována dvěma základními způsoby:

- polykondenzační reakce kyseliny mléčné – přímou polykondenzací nelze připravit PLA o vysoké molekulové hmotnosti;
- polymerace s otevřením kruhu (ROP – „Ring Opening Polymerization“) – vychází se z nízkomolekulární formy PLA (laktidu), kde je následně změnou podmínek (teploty v určitém rozmezí) vyvolaná zpětná depolymerizace. Laktid je pomocí destilace kontinuálně odstraňován ze směsi, až do vyčerpání oligomeru. Vzniklý laktid je následně podroben ROP za vzniku vysokomolekulárního PLA [19].

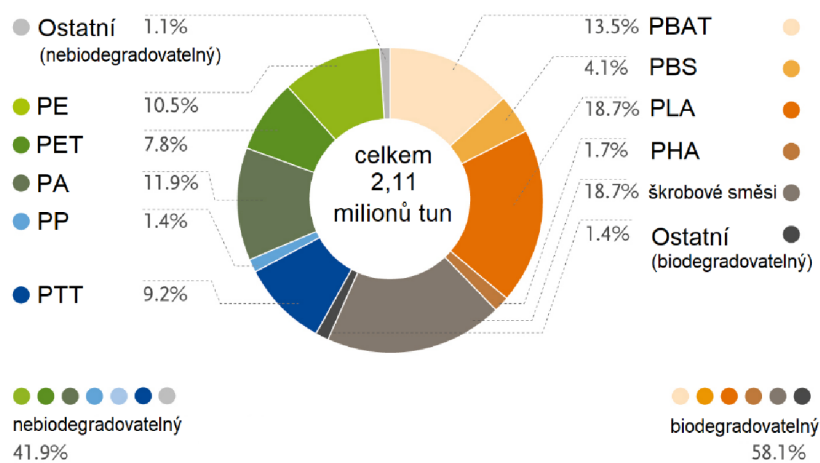
Tento základní způsob výroby PLA ilustruje následující obrázek (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Způsoby výroby PLA [20]

2.4.2 Výhody a nevýhody PLA

PLA má mnoho výhod, díky kterým se stává nejpoužívanějším biopolymerem za rok 2020, kde zaujímal 18,7% celosvětové produkce bioplastů, toto lze vidět na obr. 2.6. [21]



Obr. 2.6 Celosvětová produkce bioplastů 2020 [21]

Mezi výhody PLA patří především:

- **ekologičnost** – kromě toho, že je založen na biologickém základě (například kukuřice, pšenice, rýže), je také biologicky odbouratelný, recyklovatelný a lze jej zkompostovat. Dalším bonusem je také fakt, že při jeho výrobě se spotřebovává oxid uhličitý;
- **biokompatibilita** – Biokompatibilita je z pohledu biomedicínské aplikace nejzajímavějším aspektem PLA. Materiál, který je biologicky kompatibilní by neměl vyvolávat toxické účinky v místních tkáních. Navíc není jeho degradace toxická (při nižším složení);
- **zpracovatelnost** – ve srovnání s ostatními biopolymery má PLA lepší tepelnou zpracovatelnost. Může být zpracován technologiemi vstřikování, vytlačování, vyfukování, tvarování za tepla a dalšími;
- **úspora energie** – z hlediska nákladů je PLA potenciálně výhodný polymer, vyžaduje o 25 – 55% méně energie na výrobu než polymery na bázi ropy [17].

Ačkoliv má PLA mnoho výhod, tak má i nevýhody, které znemožňují jeho použití v některých aplikacích:

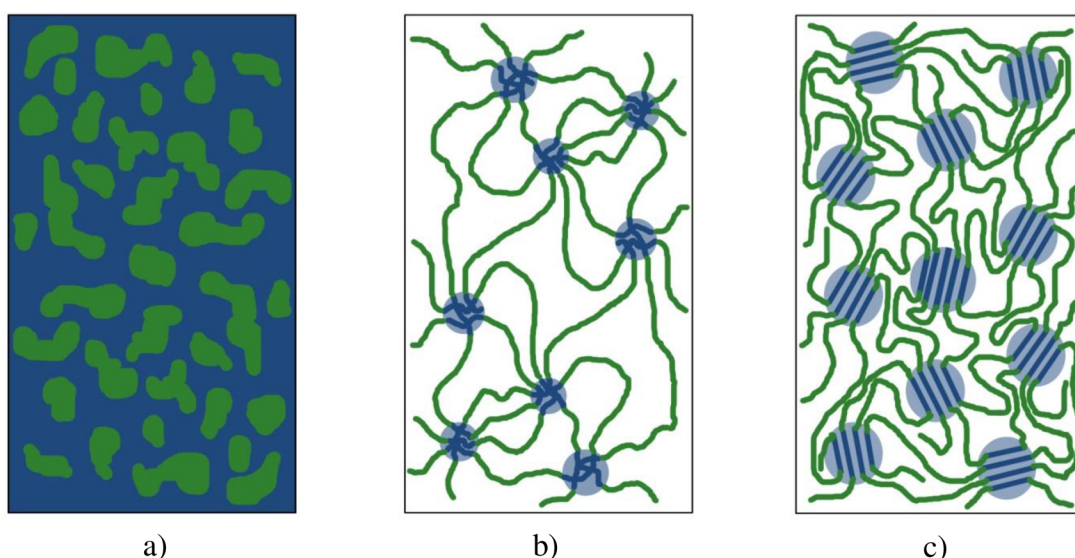
- **nízká houževnatost** – jak již bylo zmíněno, tak je PLA velmi křehký materiál, který se s méně než 10% prodloužení přetrhne. Proto jeho špatná houževnatost omezuje jeho použití;
- **pomalá degradace** – PLA degraduje hydrolýzou hlavních esterových skupin. Rychlost degradace závisí na krystalinitě, molekulové hmotnosti, morfologii a mimo jiné taky na rychlosti difúze vody do polymeru. Přirozeně, tak degraduje v prostředí velice pomalu a je nutné jeho průmyslové kompostování;
- **hydrofobicita** – PLA je relativně hydrofobní, se statickým kontaktním úhlem pro vodu asi 80 %, což lze považovat v některých aplikacích za nevýhodu (biomedicína) a v některých za výhodu (jednoučelové obaly v potravinářství) [17].

2.4.3 Využití PLA

PLA má širokou škálu použití. Lze ho uplatnit například ve zdravotnictví (šrouby, kolíky, tyčinky a jiné, u kterých se očekává biologická rozložitelnost během 6-12 měsíců.), lahve, folie, atd. Jelikož se za tepla smršťuje, je vhodný pro použití jako obalový materiál. Jeho snadná tavitelnost umožňuje použití v oblasti 3D tisku, je to ale i jeho nevýhoda, protože nízká teplota skelného přechodu činí mnoho druhů PLA nevhodných pro zadržování horké kapaliny nebo funkčnost v prostředí s vyšší teplotou okolí [10].

2.5 Termoplastické elastomery (TPE)

Termoplastické elastomery jsou směsi nebo kopolymery založené na tvrdých termoplastických a měkkých elastomerních polymerech (viz obr. 2.7). Vlastnosti mají velmi podobné pryžím, ale jejich výhodou je možnost zpracování pomocí technologií vytlačování nebo vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty. Další velmi významnou výhodou je možnost jejich recyklace. Některé termoplastické elastomery lze rozpustit v běžných rozpouštědlech a po vypaření rozpouštědla mohou znovu získat své vlastnosti. Nicméně vlastnosti TPE obvykle nejsou tak dobré jako vulkanizované elastomery. Aplikace TPE jsou proto v oblastech na méně náročné aplikace, jako jsou: obuvnictví, izolace vodičů a těsnící hmoty. Nejsou tedy vhodné na produkty, kterými jsou: automobilové pneumatiky, chladičové hadice, hnací řemeny, atd. [3, 22, 23].



Obr. 2.7 Schématické znázornění směsi (a), blokovaných kopolymerů s amorfními segmenty (b) a krystalickými segmenty (c) [24]

Při navrhování TPE ovlivňují vztahy mezi strukturou a vlastnostmi elastomeru tři parametry:

- **výběr monomerů** – volba závisí na teplotě skelného přechodu (T_g), která je spojena s pracovním rozsahem teplot TPE. Když je provozní teplota nižší než T_g elastomerní matrice, působí TPE jako tuhý a křehký plast. Když je provozní teplota vyšší než T_g nebo teplota tání (T_m) tvrdé fáze, stávají se TPE slabě viskózními materiály;
- **složení polymeru** – procentuální zastoupení jednotlivých fází;
- **makromolekulární struktura** – aby se zajistilo vytvoření fyzicky zesíťovaných spojů nezbytných k posílení mechanické pevnosti materiálu, je třeba oba konce elastomerního segmentu spojit se sklovitými doménami [25].

TPE můžeme rozdělit do šesti základních skupin.

Elastomery na bázi olefinů (TPE–O, TPO) – jsou to směsi polypropylenových a ethlen-propylen-dienových kroučků (EPDM) nevulkanizovaných částic, kde polypropylen je matrice a tudíž TPO nabývá semikrystalické struktury. Patří mezi nakladově nejefektivnější TPE na trhu (na trhu jsou od roku 1970). Smíchat EPDM s PP lze přibližně od 10 % do 65 %, to má za následek velký rozsah vlastností. Lze je použít v různých aplikacích, například v automobilovém průmyslu, stavebnictví, obuvi a sportovní oblečení. Vlastnosti TPO viz *tab. 2.1*.

Tab. 2.1 Vlastnosti TPE-O

Vlastnosti TPE – O:	
+ cenově výhodná náhrada za pryž	+ může být UV stabilizovaný
+ dobrá odolnost proti přetržení	+ snadné zpracování
+ flexibilní při nízkých teplotách	+ může být obarvený
+ dobrá povrchová úprava	+ natíratelný (nutný základní nátěr)
+ dobrá chemická odolnost	– deformační vlastnosti nejsou tak dobré jako u gumy

Druhou základní skupinou jsou **elastomery na bázi styrenů (TPE – S)**, kde „S“ je zkratkou pro styrenový blokový kopolymer. Obvykle jsou založeny na poly (styren – butadien – styren) (SBS) nebo poly (styren – ethylen – butylen – styren) (SEBS) kopolymerech. SBS se používá v aplikacích, kde není kladen takový důraz na stárnutí a chemickou odolnost. SEBS se vyznačuje podstatně lepší tepelnou odolností, odolností proti UV záření a lepšími mechanickými vlastnostmi. TPE – S lze zpracovat pomocí různých metod, například vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, atd. Používají se v nejrůznějších aplikacích (např. automobilový průmysl, spotřební zboží, stavebnictví, obuvnictví, aj. Vlastnosti jsou zobrazeny v *tab. 2.2*.

Tab. 2.2 Vlastnosti TPE–S

Vlastnosti TPE – S:	
+ velké rozmezí tvrdosti	+ může být UV stabilizovaný
+ odolnost proti oděru	+ snadné zpracování
+ při nízkých teplotách flexibilní	+ snadnější barvení než TPE – O
+ může být transparentní	– horší chemická odolnost než TPE – O

Třetí skupinou jsou **TPE – V, TPV, kde „V“** znamená vulkanizovaný. Jsou to směsi polypropylenu (matrice) a dynamicky vulkanizovaného EPDM kaučuku (pokud jsou částice

kaučuku nevulkanizované jedná se o TPO). Jelikož je matricí PP, zaujímá TPV semikrystalickou strukturu. Vlastnosti viz tab. 2.3.

Tab. 2.3 Vlastnosti TPE-V

Vlastnosti TPE – V:	
+ tvrdost v rozsahu 20 – 65 Shore D (závisí na poměru)	+ dobrá chemická odolnost
+ odolnost proti oděru	+ Snadné zpracování
+ dobrá odolnost proti roztržení	+ lepší únavová odolnost oproti TPO
+ vysoký rozsah pracovních teplot (-50 až 125°C)	+ odolává UV záření a povětrnostním podmínkám

Další skupinou jsou **termoplastické polyuretany (TPE-U, TPU)**, jsou částečně krystalické a vyskytují se ve dvou variantách. První na bázi polyesteru a druhá polyetheru. TPU na bázi polyesteru má lepší mechanické vlastnosti a lepší tepelnou odolnost. Vedle toho má polyetherový typ lepší flexibilitu za nízkých teplot a odolnost proti hydrolýze. Oproti termosetovému polyuretanu (PUR) je TPU vhodný pro recyklaci. Základní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.4.

Tab. 2.4 Vlastnosti TPE-U

Vlastnosti TPE – U:	
+ může být vyroben z obnovitelných surovin	+ velmi dobré vlastnosti při nízkých teplotách
+ velmi dobrá odolnost proti oděru	+ dobrá odolnost vůči olejům a tukům
+ vysoká pružnost, pevnost ve smyku	+ dobrá odolnost proti hydrolýze

Další skupinou jsou **termoplastické elastomery na bázi polyesteru (TPE-E, TPE-ET)**. Jsou to semikrystalické TPE, které mají vynikající houževnatost a pružnost, vysokou odolnost proti tečení, nárazu a únavě. Zachovávají si své vlastnosti i při zvýšených teplotách. Seznam základních vlastností viz tab. 2.5.

Tab. 2.5 Vlastnosti TPE-E

Vlastnosti TPE – E:	
+ může být vyroben z obnovitelných surovin	+ vysoká rázová houževnatost při nízkých teplotách
+ vynikající odolnost proti únavě	+ flexibilní při nízkých teplotách (-40 až 120°C)
+ Dobře tlumí zvuky a vibrace	+ vynikající odolnost vůči olejům a rozpouštědlům

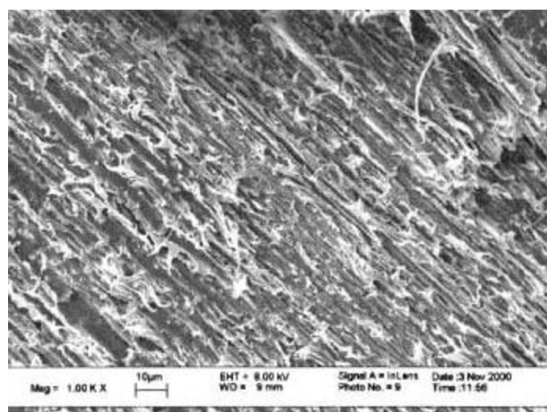
Poslední skupinou jsou **termoplastické elastomery na bázi amidů (TPE–A, PEBA – angl. „polyether block amide“)**. Materiál má podobnou strukturu jako polyester na bázi TPE–E. Ve srovnání s jinými TPE má TPE–A nižší hustotu, lepší mechanické vlastnosti, vyšší provozní teploty a lepší chemickou odolnost [26].

2.6 Směsi

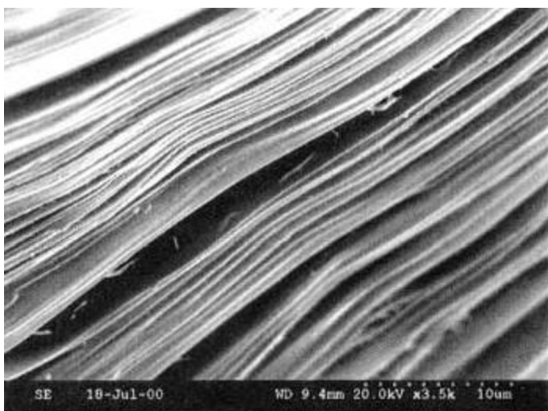
Směsi neboli blendy polymerů jsou vytvořeny smícháním dvou nebo více polymerů dohromady za účelem kombinování vlastností jednotlivých polymerů. Kompatibilizace jednotlivých fází ve směsi je dosažena fyzikálními (přidání kompatibilizátoru) nebo chemickými prostředky [27]. Většina komerčních polymerních směsí je nemísitelných, díky jejich vysoké molekulové hmotnosti, proto tvoří vícefázové struktury. Tyto vícefázové materiály mají vlastnosti určené adhezí na mezifázovém rozhraní a výslednou morfologií směsi, která vzniká během procesu míchání taveniny. Morfologie závisí na reologických vlastnostech směsi, povrchovém napětí, složením směsi a podmínkách zpracování. Struktura získaná po smíchání nemísitelných fází lze rozdělit do čtyř základních typů morfologie, viz obr. 2.8.



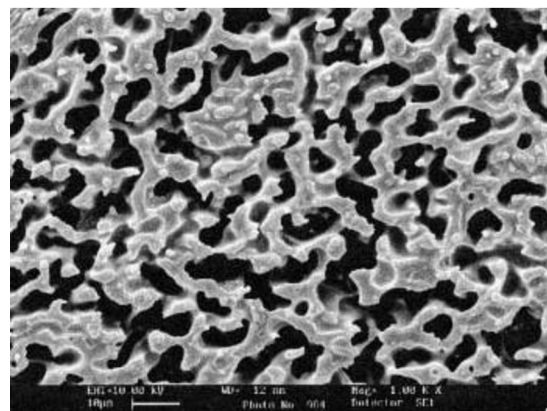
a) částicová struktura



b) vláknitá struktura



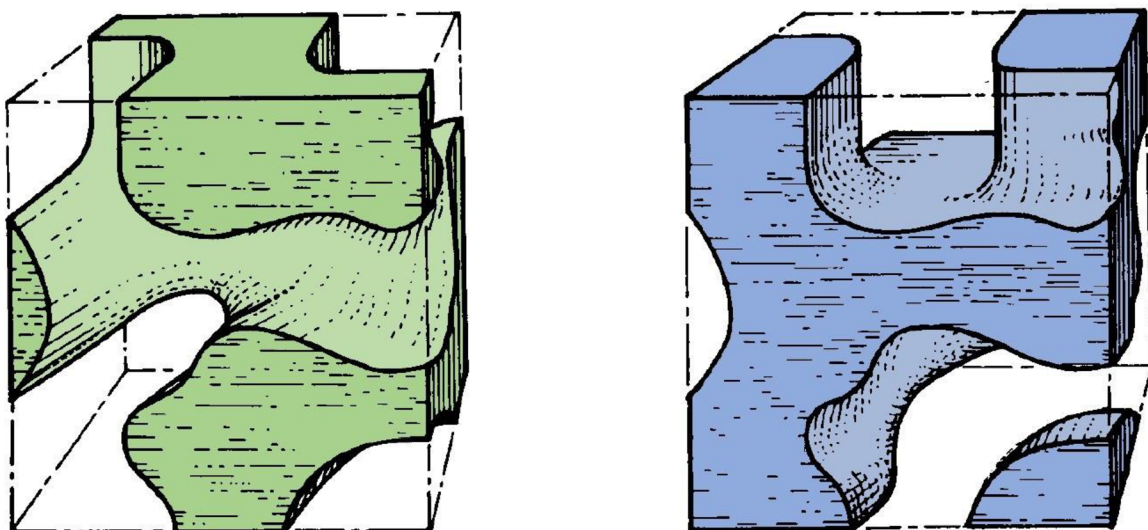
c) Lamelová struktura



d) Ko-kontinuální struktura

Obr. 2.8 Typy morfologie v nemísitelných polymerních směsích. [28]

Ko-kontinuální struktura je definována jako koexistence alespoň dvou spojitých struktur ve stejném objemu. V ko-kontinuální polymerní směsi je každá složka vlastní polymerní fází s vnitřní strukturou [28]. Znamená to tedy, že v binární ko-kontinuální směsi je povrch každé fáze přesná topologická replika fáze druhé. Toto je znázorněno na *obr. 2.9*.

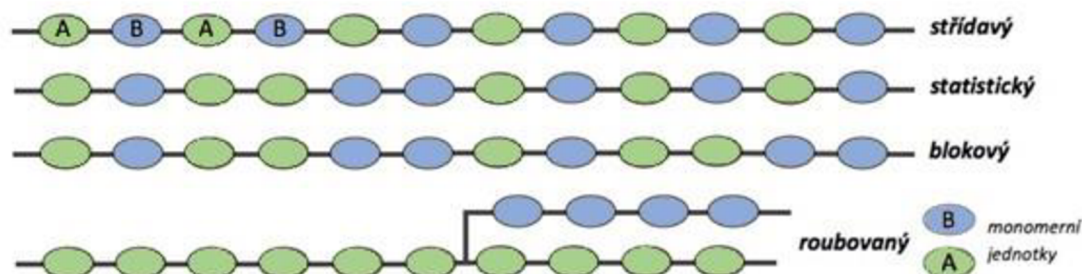


Obr. 2.9 Model struktury obou složek ko-kontinuální směsi [28]

2.6.1 Příprava a zpracování polymerních směsí

Existuje několik způsobů přípravy polymerních směsí, jedním ze způsobů je míchání v tavenině. Tato metoda přípravy je nerozšířenější. Složky směsi jsou míchány v tavenině na vytlačovacích strojích nebo v hnětačích. U této metody je výhodou, že složky směsi jsou dobře definované a dále univerzálnost míchacích zařízení. Metoda má i svá úskalí v podobě nežádoucích chemických změn (např. štěpení, síťování řetězců). Další nevýhodou je velká energetická náročnost. Druhým způsobem přípravy polymerních směsí je míchání v roztoku. Tato metoda je hojně používána při laboratorní přípravě polymerních směsí. V průmyslu se využívá pro přípravu tenkých membrán, povrchových vrstev nebo nátěrových hmot. Složky jsou zde rozpuštěny ve společném rozpouštědle a roztok se poté promíchá. Následně je rozpouštědlo separováno precipitací nebo odpařením. Výhodou u tohoto způsobu je rychlá homogenizace směsi bez velké spotřeby energie a lze se vyhnout nežádoucím chemickým reakcím. Nevýhodou je potřeba najít společné rozpouštědlo obou složek, tyto rozpouštědla jsou především organického původu a často jsou jedovaté nebo karcinogenní. Mícháním latexu což je další způsob přípravy lze dosáhnout směsí s heterogenitami v řádech 10 μ m bez velké spotřeby energie a bez použití organických

rozpouštědel. Nevýhodou je nedostatek většiny syntetických polymerů ve formě latexu. Dalším způsobem přípravy je částečná bloková nebo roubovací kopolymerace. Při této metodě vznikají homopolymery modifikované malým množstvím blokového nebo roubovaného kopolymeru. Schéma různých typů kopolymeru viz obr. 2.10.



Obr. 2.10 Typy morfologie v nemísitelných polymerních směsích [3]

Vzniklý kopolymer zajišťuje dobrou adhezi na mezifázi a stabilitu fázové struktury směsi při dalším zpracování. Vlastnosti směsi připravených tímto postupem jsou většinou lepší než směsi připravené mícháním v tavenině. Nevýhodou ve srovnání s mícháním v tavenině je komplikovaná a investičně náročná technologie, která je srovnatelná s výrobou nového homopolymeru. Díky těmto aspektům se v praxi používá jen pro výrobu komerčně úspěšných materiálů s širokou škálou použití (akrylonitril-butadien-styren (ABS), houževnatý PS, houževnatý PP a další) [29].

3 Experimentální část

Experimentální část se zabývá výrobou zkušebních polymerních těles a hodnocením jejich vlastností. Polymer tvoří v různém poměru kyselina polymléčná (PLLA) a termoplastický elastomer na bázi polyesteru (TPE-E, TPC), dále jen TPE. Pro zvýšení kompatibility bylo přidáváno aditivum na bázi kopolymeru poly(ethylen–methylakrylát–glycidyl–methakrylát) (EMA-GMA). Nejdříve byla vytvořena směs v určitém poměru jednotlivých fází a následně byly zhotoveny zkušební tělesa, u kterých byly studovány mechanické vlastnosti.

3.1 Materiály

Jakožto hlavní fáze byla k experimentálnímu výzkumu zvolena PLLA matrice s obchodním názvem Lumini L130 od výrobce Total Corbion. Za účelem zvyšování houževnatosti byl do základní matrice dávkován biodegradovatelný termoplastický elastomer na bázi polyesteru s obchodním označením NP EL 208-65A od firmy NaturePlast.

Pro zlepšení adheze a dosažení jemné disperzní fázové struktury je v některých případech k zapotřebí přidat buď blokový nebo roubovaný kopolymer, případně reaktivní kompatibilizátor. V této práci byl přidán kompatibilizátor EMA–GMA od firmy Sigma-aldrich.

3.2 Složení směsí

V rámci experimentálního výzkumu byli zhotoveny zkušební tělesa, které se od sebe liší v procentuálním zastoupení termoplastického elastomeru vůči PLLA a také v procentuálním zastoupení kompatibilizátoru, který je v poměru vůči TPE 30/70. Složení a označení jednotlivých variant je shrnuto v *tab. 3.1*.

Tab. 3.1 Označení a složení jednotlivých vzorků

Označení	Procentuální zastoupení jednotlivých fází (hmot. %)		
	PLLA	TPE	EMA-GMA
PLLA	100	0	0
PLLA/10TPE	90	10	0
PLLA/10TPE/4,3EMA	85,7	10	4,3
PLLA/20TPE	80	20	0
PLLA/20TPE/8,6EMA	71,4	20	8,6
PLLA/30TPE	70	30	0
PLLA/30TPE/12,9EMA	57,1	30	12,9
PLLA/40TPE	60	40	0
PLLA/40TPE/17,2EMA	42,8	40	17,2

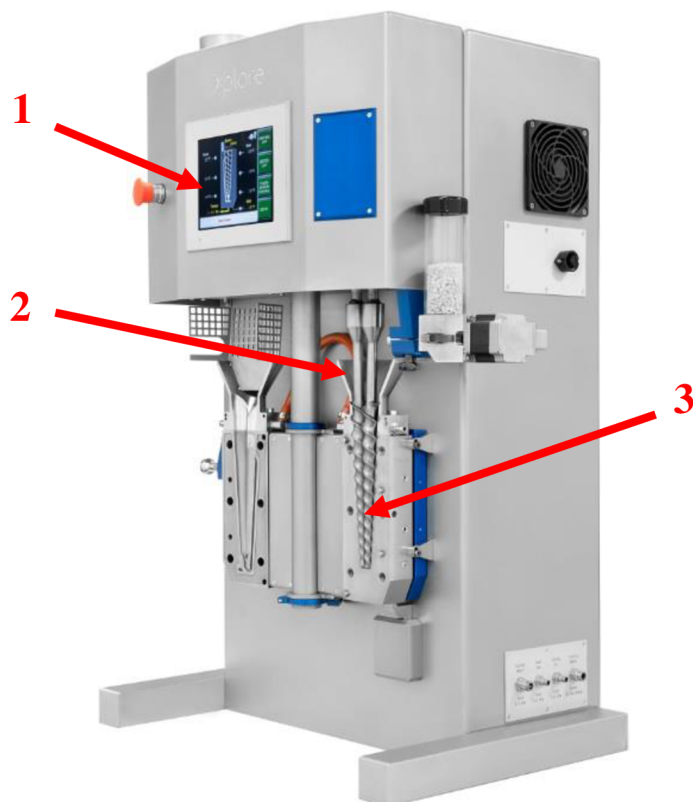
3.3 Proces výroby zkušebních těles

Výroba probíhala v laboratorních podmínkách katedry strojírenské technologie na mikrokompaundéru Xplore MC15 HT (viz obr. 3.1) a na vstříkovací jednotce iM12 (viz obr. 3.2). Směs polymerů ve formě granulátu byla dodávána přes vodou chlazenou násypku, následně byla tato směs pomocí dvojice kónických šneků, které měly nastavenou konstantní rychlost otáčení na 100 ot/min, dopravována do pracovní komory, u níž byla nastavena 180 °C. Díky vestavěnému recirkulačnímu kanálu, který umožňoval neustálé proudění taveniny, se směs začala homogenizovat. Doba homogenizace byla stanovena na 2 min. Tavenina polymerů a jejich směsí byla extrudována do vyhřívané komory vstříkovacího lisu, jenž je součástí vstříkovací jednotky iM12. Takto naplněná vyhřívaná komora byla vložena do vstříkovacího lisu, který za pomoci pneumatického pístu komoru přitlačil k formě a vstříknul taveninu do její dutiny, jejíž negovaný tvar odpovídá normalizovaným zkušebním tělesům. Komora vstříkovacího lisu byla nastavena na teplotu 180 °C, která je stejná jako na výstupu z mikrokompaundéru. Vstříkování bylo realizováno, jako vstříkování do studené formy (50 °C). Byly použity formy umožňující výrobu normalizovaných tahových těles typu 1B dle normy ČSN EN ISO 527 a zkušebních těles o rozměrech (80×10×4) mm dle normy ČSN EN ISO 180.



Obr. 3.1 vstříkovací jednotka iM12

1) Vyhřívaná komora s formou, 2) přitlačení pístu, 3) komora vstříkovacího lisu



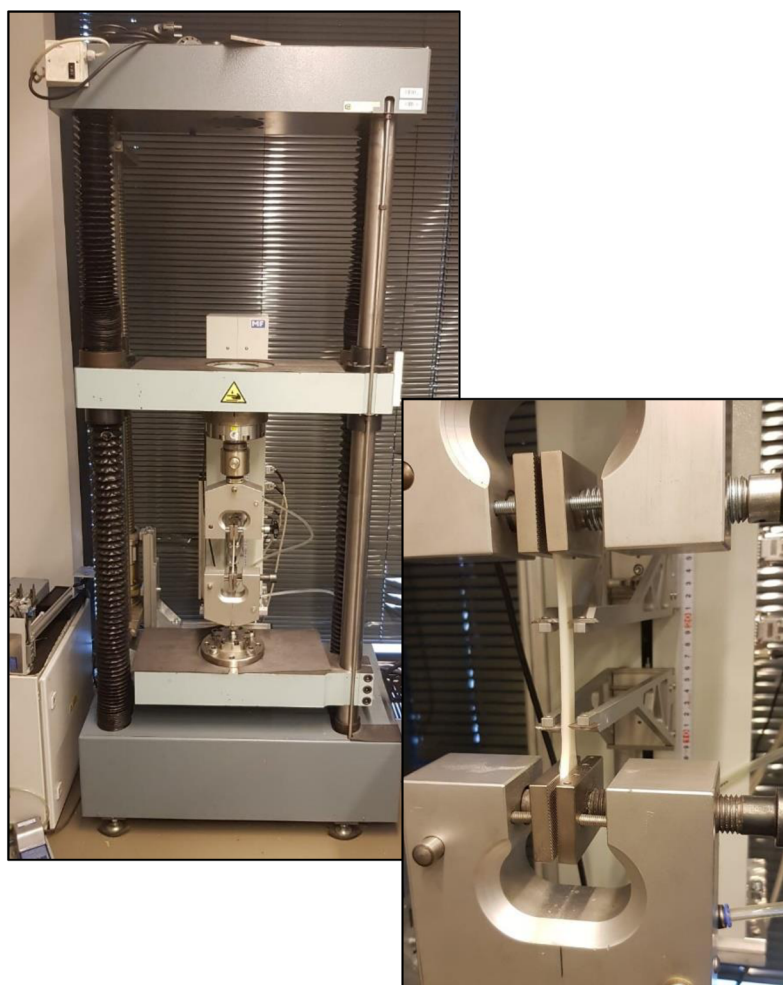
Obr. 3.2 Mikrokompaundér Xplore MC 15 HT
1) dotykový display, 2) násypka, 3) kónické šneky

3.4 Průběh měření

U vzorků byly studovány jejich statické tahové a dynamicko-mechanické vlastnosti. Zvoleny tedy byli zkoušky tahem a zkoušky rázové houževnatosti.

3.4.1 Tahová zkouška

Ke stanovení tahové charakteristiky byl použit trhací stroj TIRAtest 2300 (viz obr. 3.3), pomocí kterého byli změřeny hodnoty mezi pevnosti v tahu (σ_m), modulu pružnosti v tahu (E_t) a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení (ε_{tb}). Normalizované tahové těleso bylo upnuto do čelistí (které byly od sebe vzdáleny 115 mm), tak aby osa tělesa byla ve vertikální poloze. Měření se skládalo ze dvou fází. V první fázi byla rychlost zatěžování 1 mm/min., kde se měřil modul pružnosti v tahu v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1. Druhou fází bylo měření poměrného prodloužení při přetržení a mezi pevnosti v tahu, které probíhalo při rychlosti zatěžování 5 mm/min, a to do té doby, dokud nedošlo k přetržení. Pro všechna měření bylo použito 10 zkušebních vzorků. Výsledky byly za pomoci softwaru zaznamenány a následně zpracovány do tab. 3.2.



Obr. 3.3 Trhací zařízení TIRAtest 2300

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty tahových charakteristik

Vzorky	E_t [MPa]		σ_m [MPa]		ε_{tb} [%]	
	průměr	s	průměr	s	průměr	s
PLLA	3581	51	73,6	1,0	5,0	0,9
PLLA/10TPE	3142	54	58,7	1,1	3,0	0,3
PLLA/10TPE/4,3EMA	2879	231	49,9	1,4	8,7	3,8
PLLA/20TPE	1982	165	41,6	1,2	10,9	6,9
PLLA/20TPE/8,6EMA	1567	46	31,4	0,3	227,0	32,9
PLLA/30TPE	66	15	16,9	2,4	254,4	16,6
PLLA/30TPE/12,9EMA	121	12	18,4	0,6	271,3	11,7
PLLA/40TPE	195	14	16,9	0,9	245,9	19,0
PLLA/40TPE/17,2EMA	108	3	13,5	0,2	380,5	15,7

3.5 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti

Měření bylo provedeno na stroji Zwick HIT50P a také na Resil Ceast 5.5 (viz obr. 3.4) metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1 [30]. U této metody je zkušební těleso uloženo na dvou podporách a úderem kyvadla do středu užší strany dojde k jeho přeražení. Výstupní

hodnota ze stroje je E_c [J] tedy energie spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa, která je následně použita pro výpočet rázové houževnatosti (viz rovnice č.1) a v případě tělesa opatřeného vrubem se E_c použije pro výpočet vrubové houževnatosti (viz rovnice č.2)

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (1)$$

$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \quad (2)$$

Kde a_{cU} značí rázovou houževnatost dle Charpyho [kJ/m²], h tloušťku zkušebního tělesa a b šířku zkušebního tělesa. Pro vyhodnocení vrubové houževnatosti plastů se zkušební tělesa opatřují vrubem tvaru „V“. [3]



Obr. 3.4 Zwick HIT50P (vlevo), Resil Ceast 5.5 (vpravo)

Měření bylo provedeno 10× u každé varianty za normální laboratorní teploty (23 °C) a následně také 5× pro každou variantu při teplotě -40 °C z důvodu nepřeražení vzorků s vyšším obsahem TPE a EMA. Poté bylo k zapotřebí vytvoření vrubu typu A, jelikož se vzorky nedařilo přerazit. Zařízení Resil Ceast 5.5 s 5 J kladivem bylo použito pro měření vrubové houževnatosti při -40 °C, pro ostatní zkoušky bylo použito zařízení Zwick HIT50P s nominální energií kladiva 50 J. Výsledné průměrné hodnoty rázové houževnatosti s jejich směrodatnými odchylkami jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 rázová houževnatost

Vzorky	$a_{cU} 23\text{ °C} [kJ/m^2]$		$a_{cU} -40\text{ °C} [kJ/m^2]$	
	Průměr	s	průměr	s
PLLA	19,69	0,58	25,92	0,78
PLLA/10TPE	27,49	1,49	29,49	1,17
PLLA/10TPE/4,3EMA	61,66	8,07	39,91	6,6
PLLA/20TPE	46,48	4,53	36,42	4,83
PLLA/20TPE/8,6EMA	–	–	49,04	4,79
PLLA/30TPE	–	–	94,12	22,18
PLLA/30TPE/12,9EMA	–	–	136,39	15,78
PLLA/40TPE	–	–	178,14 (N)	27,74
PLLA/40TPE/17,2EMA	–	–	–	–

Následným vytvořením vrubu, se měřila vrubová houževnatost u které lze pozorovat, že je o poznání nižší než rázová houževnatost. Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky lze vidět v tab. 3.4.

Tab. 3.4 vrubová houževnatost

Vzorky	$a_{cU} -40\text{ °C}$	
	průměr	s
PLLA	2,89	0,10
PLLA/10TPE	3,52	0,34
PLLA/10TPE/4,3EMA	4,26	0,09
PLLA/20TPE	3,80	0,12
PLLA/20TPE/8,6EMA	5,10	0,30
PLLA/30TPE	6,44	0,53
PLLA/30TPE/12,9EMA	7,79	0,27
PLLA/40TPE	6,69	0,45
PLLA/40TPE/17,2EMA	9,13	0,67

3.6 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) – analýza

Skenovací elektronový mikroskop umožňuje zobrazení povrchu vzorku ve vysokém rozlišení. Výsledný černobílý obraz vypovídá nejen o textuře vzorků, ale i o jeho prvkovém složení, jelikož atomy s vyšším prvkovým číslem se na fotografii zobrazí jako světlejší [31]. Ve vlastním měření bylo realizováno na stroji TESCAN MIRA3 (viz obr. 3.5). Před samotným zahájením měření byly jednotlivé vzorky lomových ploch zkráceny a připevněny na terčíky. Následně byli za pomoci stroje Leica EM ACE600 (viz obr. 3.6) pokoveny vrstvou směsi platina/paladium o tloušťce 3 nm, pro lepší odraz elektronů. Poté byly takto připravené vzorky vloženy do pracovní komory mikroskopu (viz obr. 3.7), kde

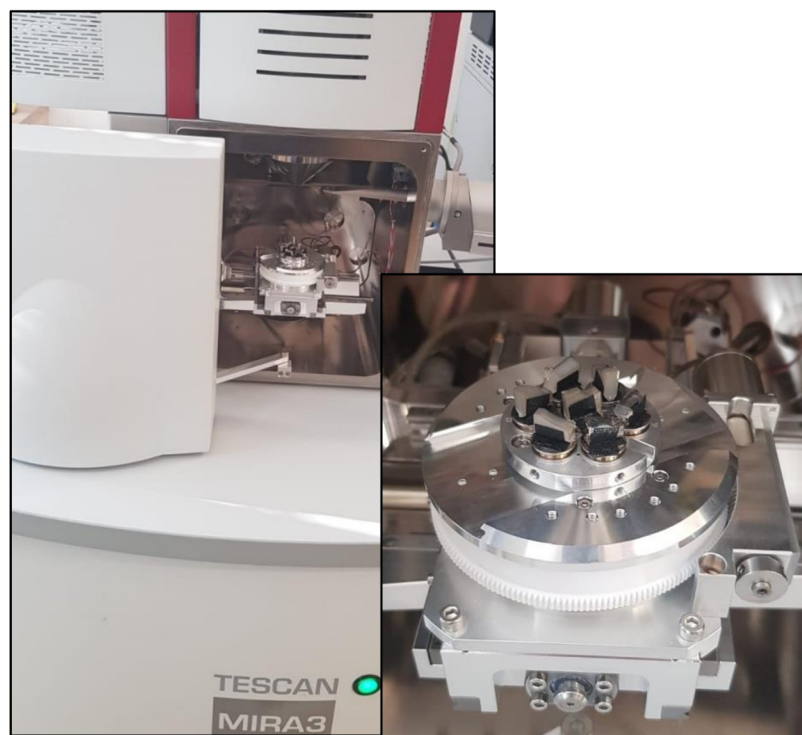
při měření vzniká vakuum. Na vzorky dopadal svazek elektronů a následným odražením zpět od rastrovaného povrchu byl vytvořen výsledný obraz.



*Obr. 3.5 Elektronový mikroskop
TESCAN MIRA3*



Obr. 3.6 Naprašovací zařízení Leica EM ACE600



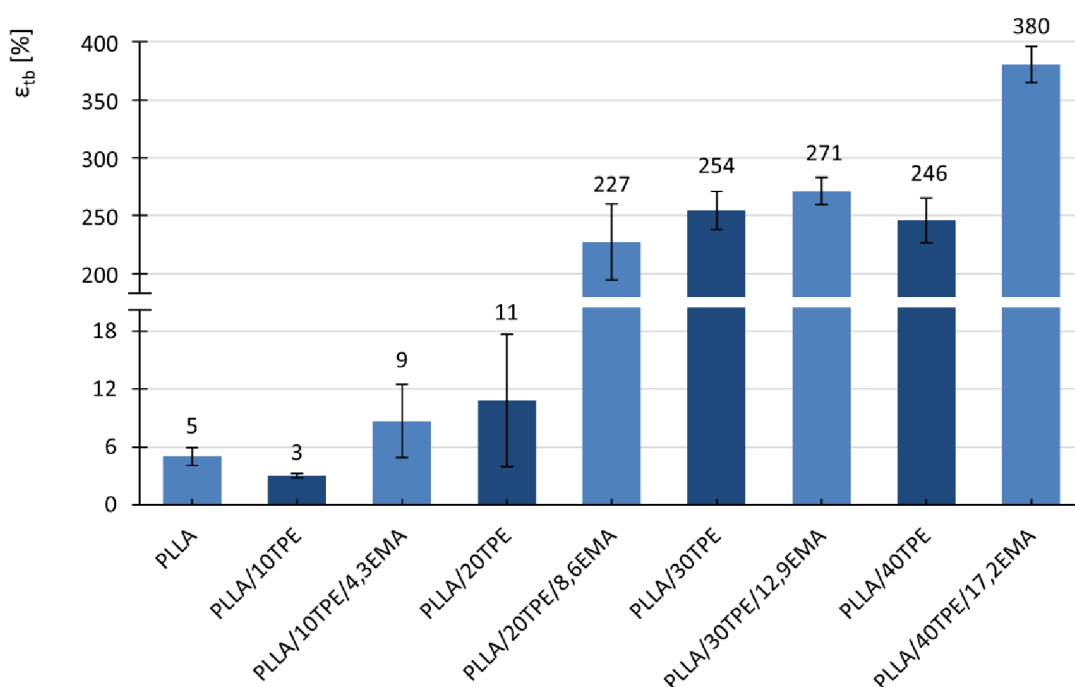
Obr. 3.7 Komora stroje TESCA MIRA3 s vloženými vzorky

3.7 Vyhodnocení a diskuse výsledků

V této bakalářské práci se vyhodnocení a diskuse výsledků zabývá porovnáním fyzikálních vlastností materiálu v závislosti na obsahu jednotlivých fází.

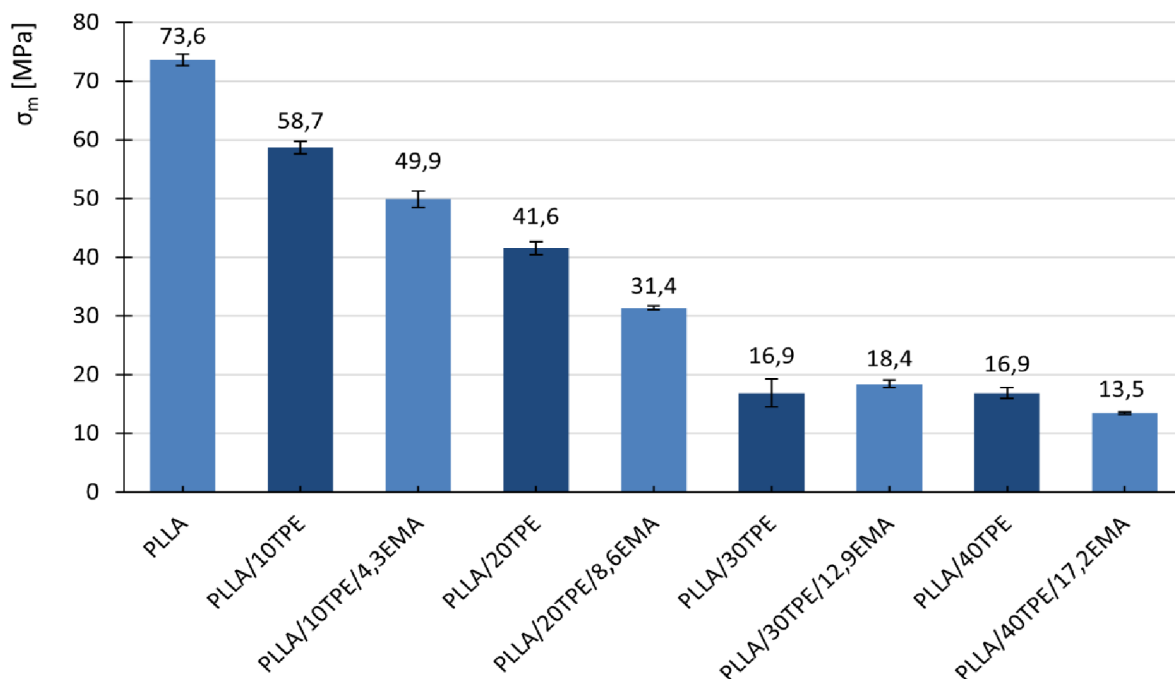
3.7.1 Tahová zkouška

Z tahových charakteristik (viz tab. 3.2) v přechozí kapitole byly vytvořeny závislosti na různém složení materiálu (viz obr. 3.8, obr. 3.9 a obr. 3.10). Z grafu na obr. 3.8 je patrné, že do složení PLLA/20TPE/8,6EMA se hodnoty nijak závratně neměnily, avšak při obsahu 20 % TPE a 8,6 % EMA se jmenovité poměrné prodloužení při přetržení zvýšilo téměř 21krát oproti směsi bez kompatibilizátoru. Po tomto skoku se opět hodnoty lišily nepatrně, až do poslední směsi na bázi PLLA/40TPE/17,2EMA, kde došlo opět k nárůstu hodnoty ε_{tb} a to až na 380 %.



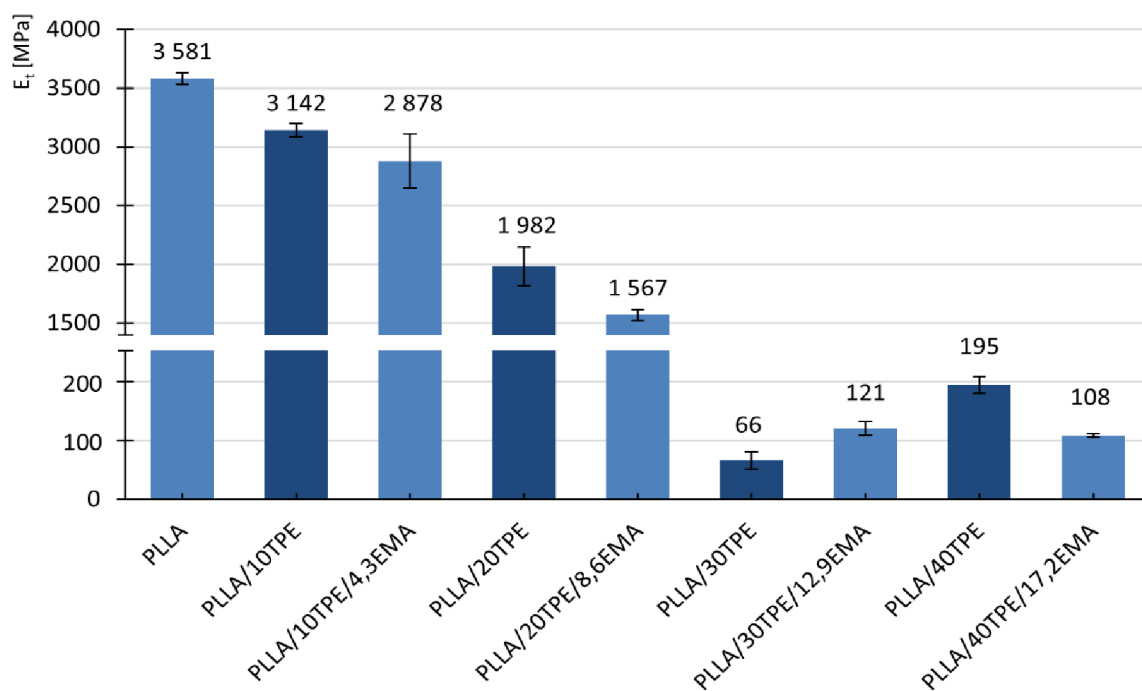
Obr. 3.8 graf jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení jednotlivých směsí

Při vyhodnocení meze pevnosti v tahu v grafu na obr. 3.9 lze pozorovat, že při zvyšování obsahu TPE a EMA docházelo ke snížení meze pevnosti v tahu a to až do okamžiku, kdy směs obsahovala 30 %TPE. Přídavkem 4,3 % EMA do systému PLLA/10TPE došlo ke snížení σ_m o 15 % oproti nekompatibilizované binární směsi. Při porovnání směsí, které obsahují 10 %TPE a 20 %TPE se mez pevnosti v tahu snížila téměř o 30 %. Obdobné chování pozoroval i Deng a kol. [32], který pozoroval, že se zvyšujícím se obsahem PBAT v PLA matrici se snižovalo σ_m a E_t . Oproti tomu námi naměřené hodnoty σ_m směsí s obsahem 30 %TPE a více se ustálily okolo hodnoty 16 MPa.



Obr. 3.9 graf mezi pevnosti v tahu jednotlivých směsí

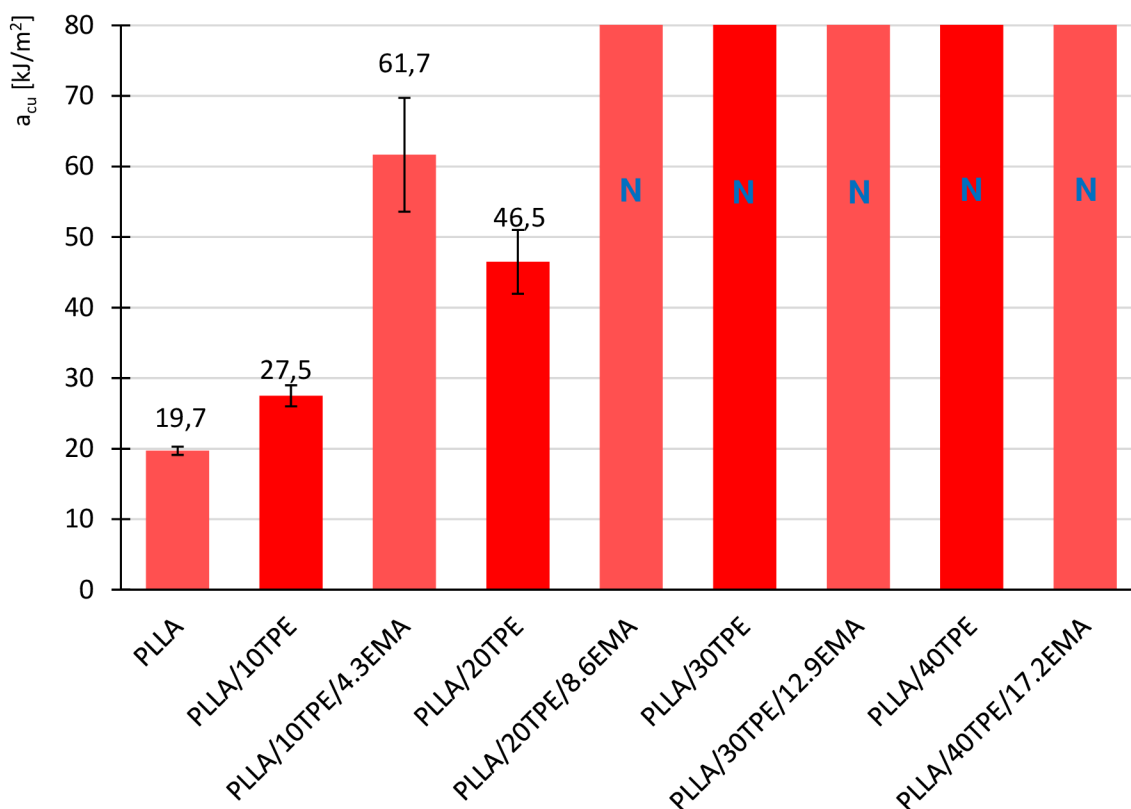
Z grafu na obr. 3.10 lze vyhodnotit, že se zvyšujícím se obsahem TPE i EMA se hodnoty modulu pružnosti v tahu snižují. Toto platí až do směsi která obsahuje 20 %TPE a 8,6 %EMA. Z důvodu, že PLA má vyšší modul pružnosti než TPE, tak při zvyšování obsahu TPE se E_t snižuje. Se zvýšením obsahu TPE z 30 % na 40 % lze pozorovat téměř trojnásobný nárůst modulu pružnosti. To může být zapříčiněno přechodem z částicové na vláknitou strukturu (viz obr. 3.10 a příloha P7).



Obr. 3.11 graf modulu pružnosti v tahu jednotlivých směsí

3.7.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti

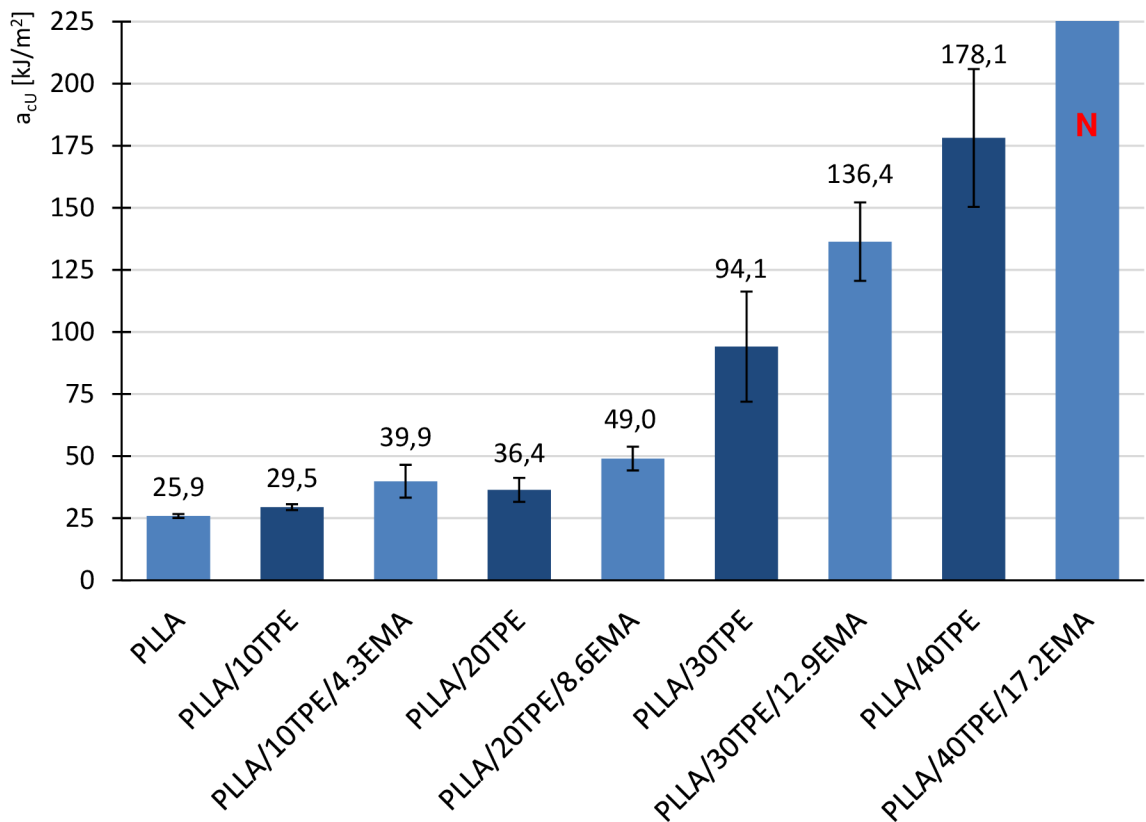
Vyhodnocení rázové a vrubové zkoušky probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1. Z grafu na obr. 3.11, který znázorňuje rázovou houževnatost při 23 °C je patrné, že s přibývajícím množstvím TPE a se houževnatost zvyšovala. Například při porovnání vzorků s 10 %TPE a 20 %TPE se hodnota a_{cU} zvýší o 69 %. Velký nárůst a_{cU} lze také pozorovat u ternárních směsí (PLLA/10TPE/4,3EMA), kde došlo k nárůstu až o 125 % oproti nekompatibilizované binární směsi. Hodnota rázové energie 61,7 kJ/m² překračuje limit superhouževnatých polymerních materiálů, které poprvé v roce 1972 popsal Wu [33]. Z důvodu nepřeražení vzorku s vyšším obsahem TPE a EMA (vzorky označené písmenem N), bylo zapotřebí vzorky zchladit na teplotu -40 °C, což je hluboko pod teplotou zesklenní PLLA a blízko T_g obou minoritních fází.



Obr. 3.12 Graf rázové houževnatosti při 23 °C

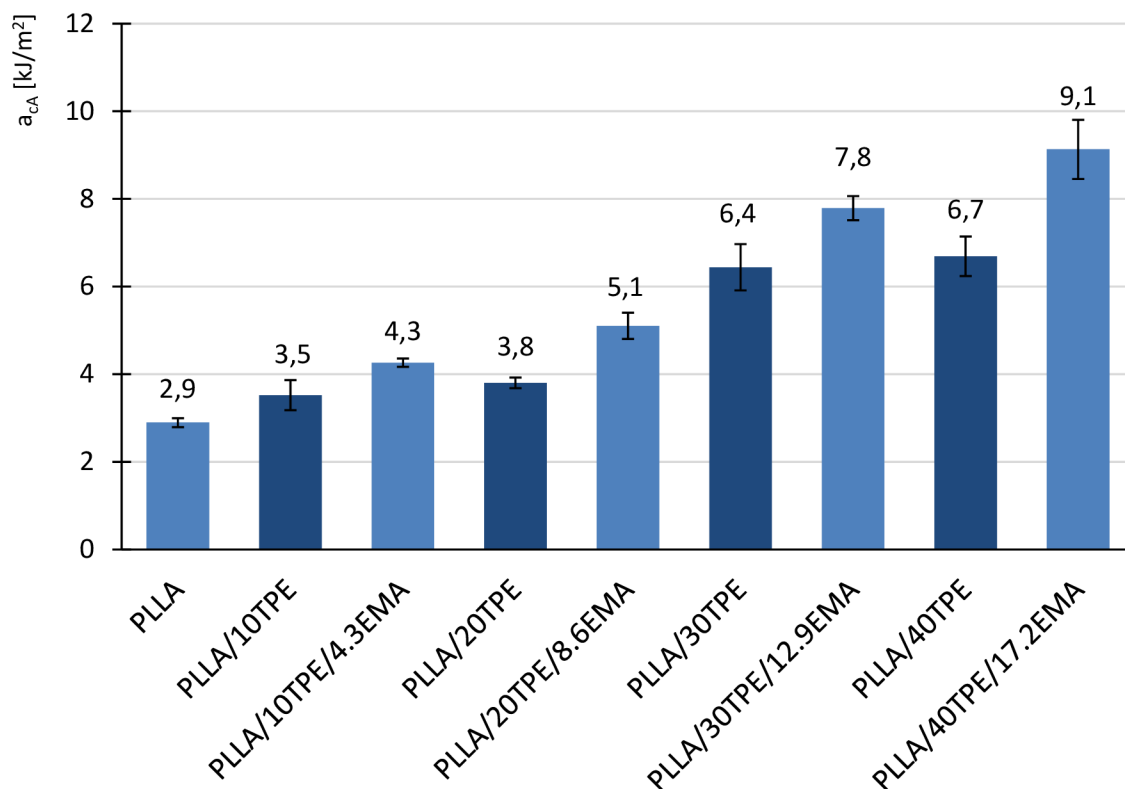
Z grafu na obr. 3.12 lze pozorovat, že rázová houževnatost při -40 °C narůstala exponenciálně. Při porovnání PLLA s binární PLLA/10TPE lze pozorovat nárůst a_{cU} o 14 %, v případě přidání EMA je tento nárůst až o 54 %. Obdobný trend se zvýšením rázové houževnatosti lze pozorovat u směsí PLLA/20TPE a PLLA/20TPE/8,6EMA. Se zvýšením TPE na hodnotu 30 % došlo k nárůstu a_{cU} vůči PLLA o 263 %. S přidáním kompatibilizátoru

se hodnota rázové houževnatosti zvýšila oproti PLLA téměř 5,3krát. Binární PLLA/40TPE vykazuje stejný trend, ale kompatibilizovanou směs se již nepodařilo přerazit.



Obr. 3.13 Graf rázové houževnatosti při -40 °C

Z grafu na obr. 3.13, na kterém je znázorněna vrubová houževnatost při -40 °C lze pozorovat že se zvyšujícím se obsahem TPE i EMA narůstala vrubová houževnatost. Při porovnání čistého PLLA s binární PLLA/10TPE se vrubová houževnatost zvýšila o 20 %, s přidáním kompatibilizátoru se a_{cA} zvýšila téměř o 50 %. Obdobný trend lze pozorovat i u směsí obsahujících 20 % TPE i 30 % TPE. U směsí s 40 % TPE se hodnota vrubové houževnatosti u nekompatibilizované směsi dostala na hodnotu 6,7 kJ/m² oproti samotnému PLLA, které má 2,9 kJ/m². V případě kompatibilizované směsi byla hodnota a_{cA} 9,1 kJ/m².



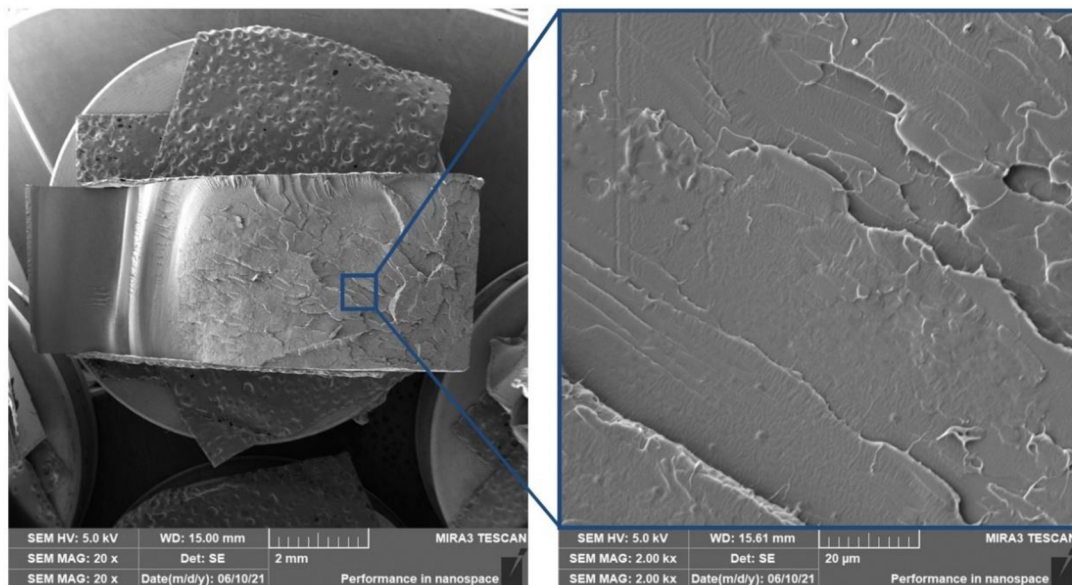
Obr. 3.14 Graf vrubové houževnatosti při -40 °C

3.7.3 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

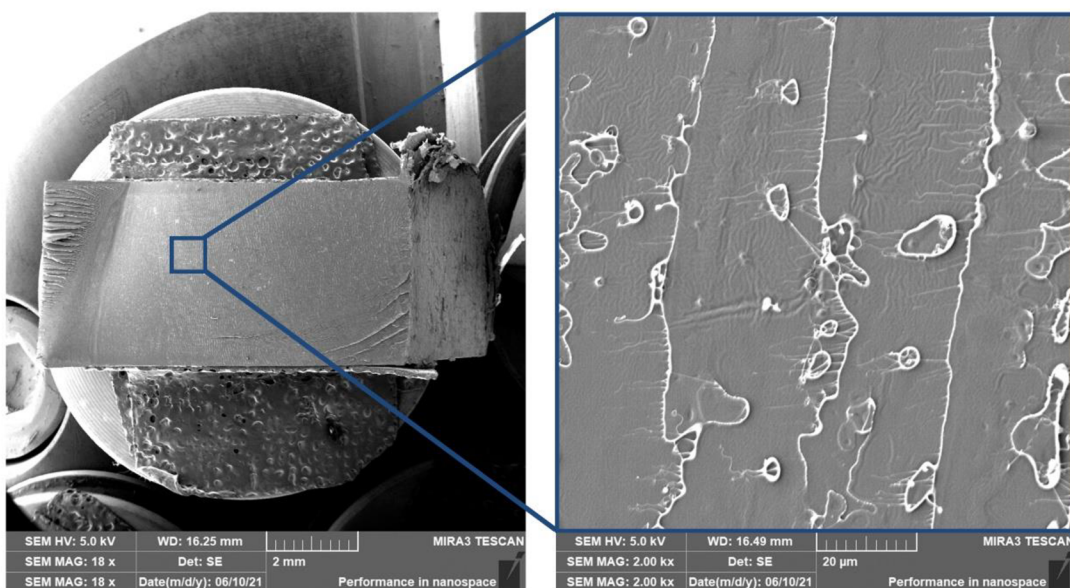
Skenovací elektronová mikroskopie byla použita za účelem vyhodnocení morfologie jednotlivých lomových ploch PLLA a připravených binárních a ternárních směsí. Následující SEM snímky podávají informace o celkové charakteristice lomové mechaniky vzorků v průběhu dynamického zatěžování rázem při teplotě -40 °C. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, vzorky byly podchlazeny na tuto teplotu z důvodu neschopnosti přerazit vzorky, které obsahovaly více jak 20 hmot. % TPE při teplotě 23 °C. Nicméně, i přes takto nízkou teplotu se nepodařilo přerazit vzorky na bázi PLLA/40TPE/17.2EMA. Na základě tohoto zjištění byla provedena zkouška vrubové houževnatosti vzorků při teplotě -40 °C. SEM snímky lomových ploch vypovídají nejen o disperzi a distribuci minoritních fázi TPE a EMA-GMA v PLLA matrici, ale i o jejich mezifázovém rozhraní.

Lomová plocha PLLA (viz obr. 3.14) vykazuje při rázovém namáhání o teplotě -40 °C porušení křehkým lomem. Oproti PLLA vzorkům testovaným na vrubovou houževnatost (viz obr. 3.15), vykazuje lom z rázové houževnatosti hrubší strukturu porušení, která je způsobená šířením trhlin z několikanásobných křejů (tzv. přetvořených zón). PLLA vzorky s iniciovanou trhlinou (vrub tvaru V) vykazují velice hladký povrch lomu, který

spotřeboval mnohem méně rázové energie než vzorky z rázové houževnatosti (viz obr. 3.12 a 3.13).



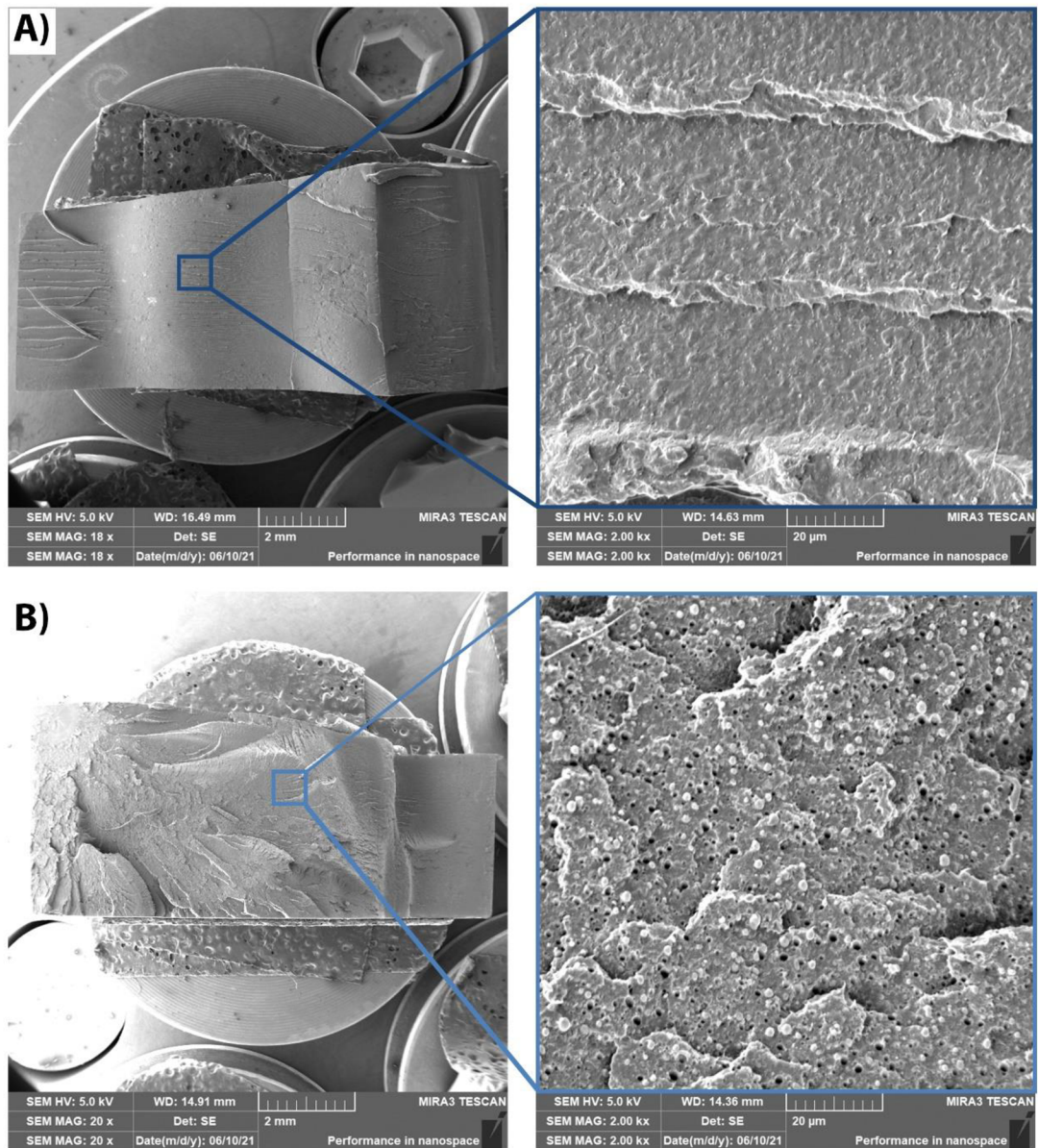
Obr. 3.15 Lomová plocha po rázové houževnatosti PLLA při -40 °C



Obr. 3.16 Lomová plocha po vrubové houževnatosti PLLA při -40 °C

Lomové plochy binárních PLLA/10TPE a ternárních PLLA/10TPE/4.3EMA vzorků z rázové houževnatosti jsou zobrazeny na obr. 3.16 (A) a obr. 3.16 (B). U binárních směsí lze opět pozorovat porušení křehkým lomem s velmi jemně dispergovanou a distribuovanou částicovou strukturou TPE v PLLA matrici. Velikost sférických částic TPE dosahuje průměrné hodnoty 510 nm a vykazuje dobrou adhezi na mezifázovém rozhraní s PLLA matricí. Oproti tomu lze u ternárních kompozitů po přidání 4,3 % EMA kompatibilizátoru

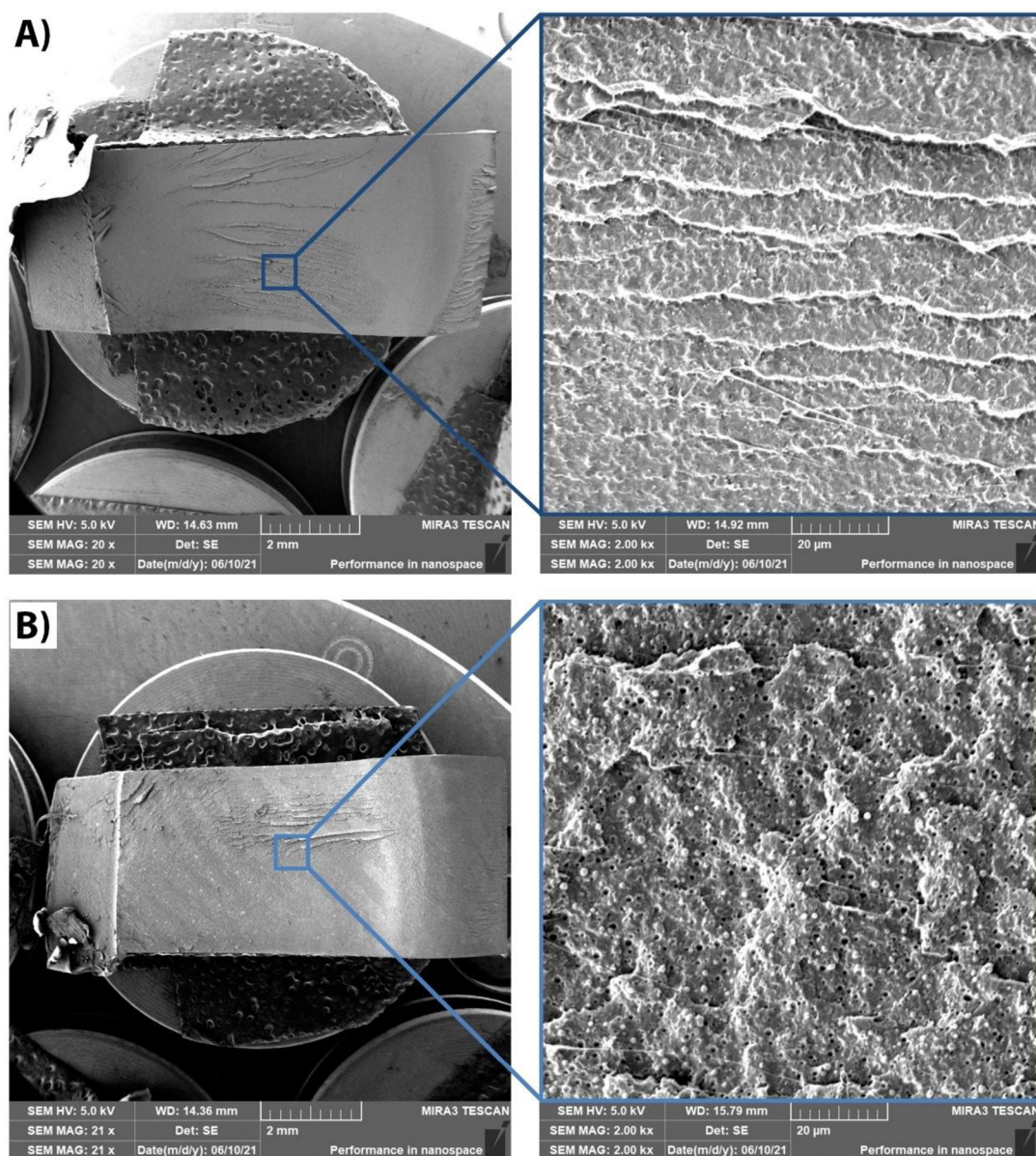
pozorovat hrubší strukturu porušení, která je doprovázena nárůstem velikosti částic TPE (~ 1,4 μm) a jejich horší distribucí v PLLA. Tato struktura pravděpodobně vedla k vyššímu rozptylu hodnot rázové houževnatosti vzorků na bázi PLLA/10TPE/4.3EMA oproti PLLA/10TPE (viz obr. 3.12). Hrubší struktura porušení a zlepšení mezifázového rozhraní vlivem přídavku kompatibilizátoru nicméně způsobilo nárůstu rázové houževnatosti ternárních vzorků.



Obr. 3.17 Lomová plocha po rázové houževnatosti při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ A) PLLA/10TPE, B) PLLA/10TPE/4,3EMA

Na obr. 3.17 lze pozorovat obdobné lomové struktury u PLLA/10TPE a PLLA/10TPE/4.3EMA vzorků opatřených vrubem jako u vzorků z rázové houževnatosti.

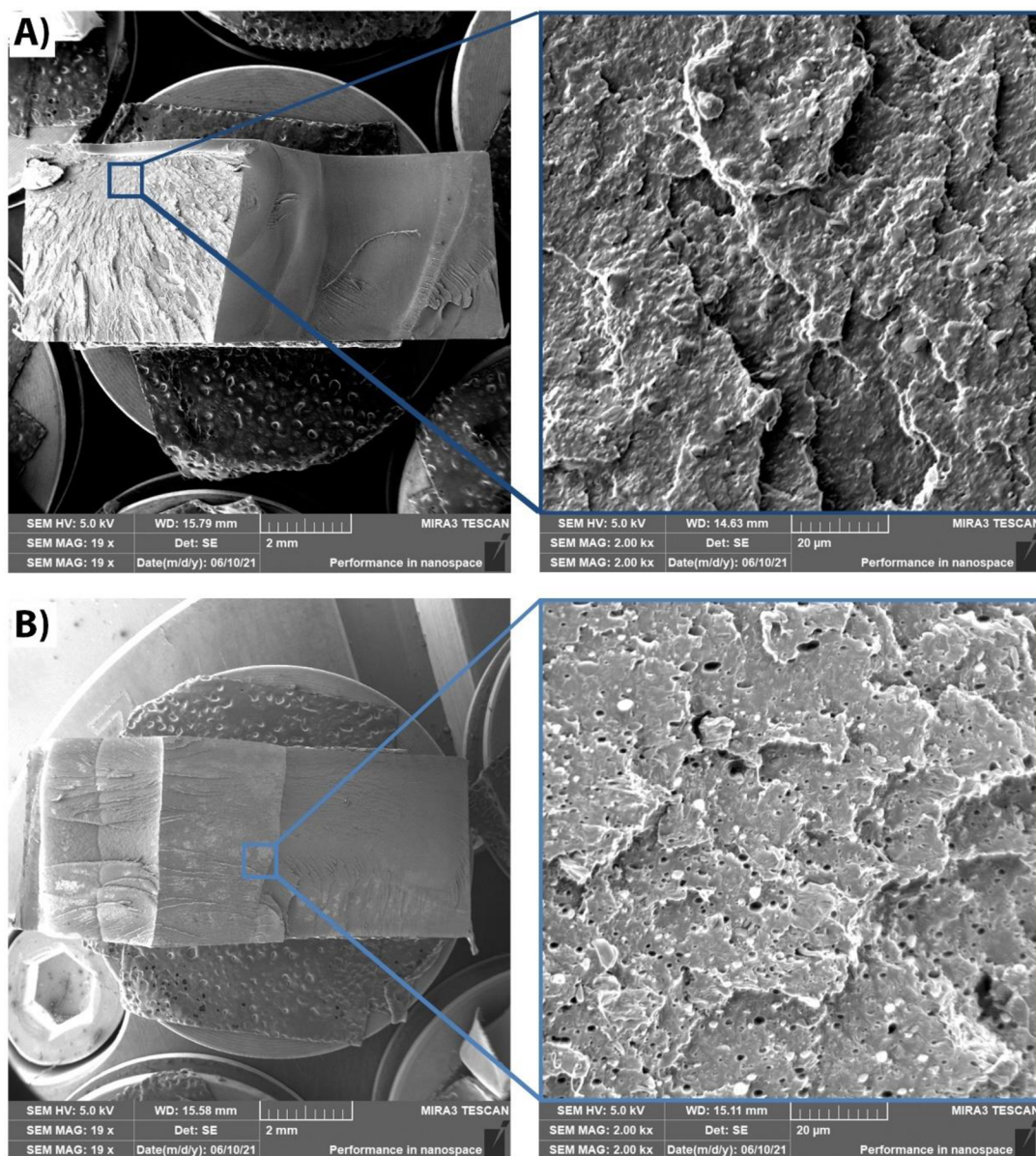
Morfologie lomových ploch i výsledky vrubové houževnatosti (viz obr. 3.13) naznačují zvýšení odolnosti ternárních vzorků proti šíření trhlin, které jsou terminovány z důvodu zlepšení kompatibility na mezifázovém rozhraní.



Obr. 3.18 Lomová plocha po vrubové houževnatosti při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ A) PLLA/10TPE, B) PLLA/10TPE/4,3EMA

SEM snímky PLLA/20TPE a PLLA/20TPE/8.6EMA vzorků z rázové houževnatosti jsou zobrazeny na obr. 3.18 (A) a obr. 3.18 (B). U binárních vzorků na obr. 3.18 (A) lze pozorovat rozdělení lomové plochy na dvě části. Lomová plocha (vlevo) vykazuje v první části několikanásobné šíření trhliny v prostoru s hrubou strukturou, kterou následuje relativně hladký povrch lomu za bodem prokluzu, kde se trhlina šířila bez odporu. Na detailním snímku (vpravo) je pak zobrazena jemná disperze TPE v PLLA matici

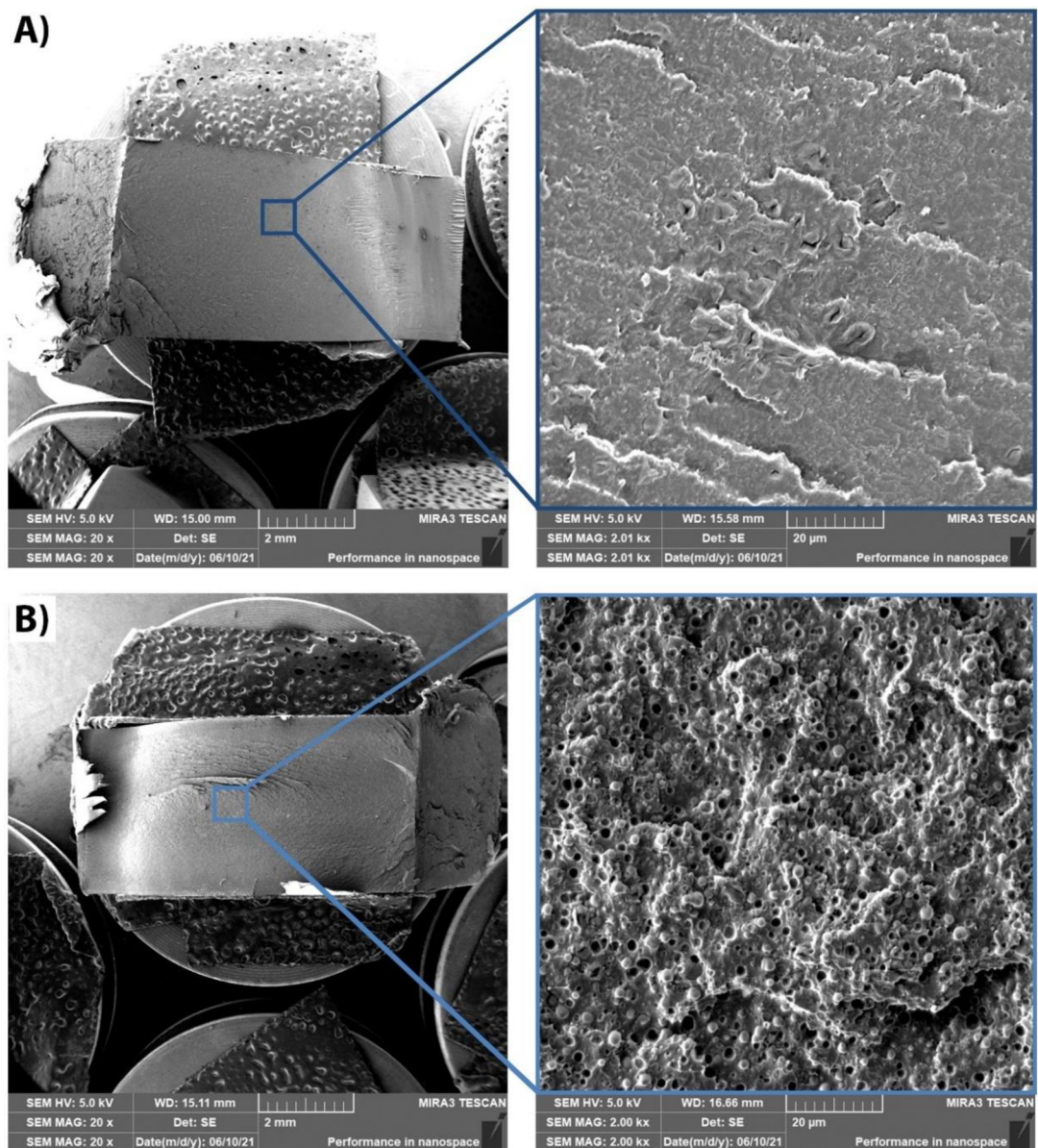
s průměrnou velikostí částic 630 nm. U ternárních vzorků na bázi PLLA/20TPE/8,6EMA lze na *obr. 3.18* (B) pozorovat křehký lom, který obsahuje dutiny a jednotlivé částice TPE, které byly deformovány do zploštěného tvaru vlivem působícího namáhání od rázového kladiva. Průměrná hodnota velikost částic TPE dosahuje ~ 1,8 μm .



Obr. 3.19 Lomová plocha po rázové houževnatosti při -40 °C A) PLLA/20TPE, B) PLLA/20TPE/8,6EMA

Lomové plochy vzorků PLLA/20TPE a PLLA/20TPE/8.6EMA, které byly opatřeny vrubem a porušeny při -40 °C jsou zobrazeny na *obr. 3.19*. Binární vzorky s obsahem 20 % TPE vykazují křehký typ porušení s relativně hladkým povrchem, kde došlo k šíření trhliny v PLLA matrici bez výrazného pohlcování rázové energie disperzní fází TPE. U kompatibilizovaných ternárních vzorků na *obr. 3.19* (B) lze pozorovat hrubší strukturu

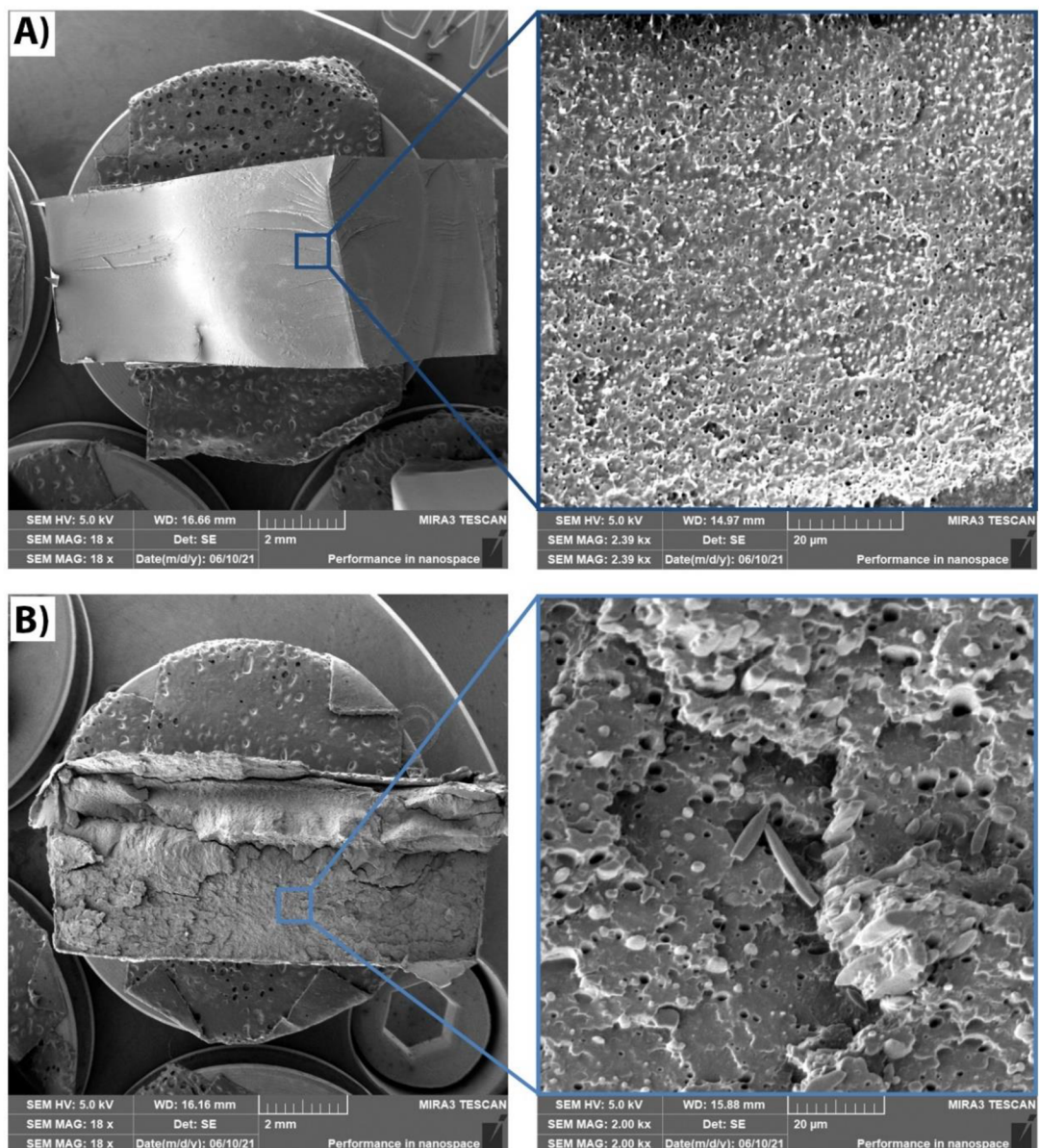
lomu a porušování na mezifázovém rozhraní PLLA/20TPE díky přidávku 8,6% EMA. Morfolgie porušování ternárních vzorků s iniciovanou trhlinou potvrzuje výsledky vrubové houževnatosti z *obr. 3.12*, kde byla oproti binárním vzorkům pozorována zvýšená schopnost pohlcovat rázovou energii.



Obr. 3.20 Lomová plocha po vrubové houževnatosti při -40 °C A) PLLA/20TPE, B) PLLA/20TPE/8,6EMA

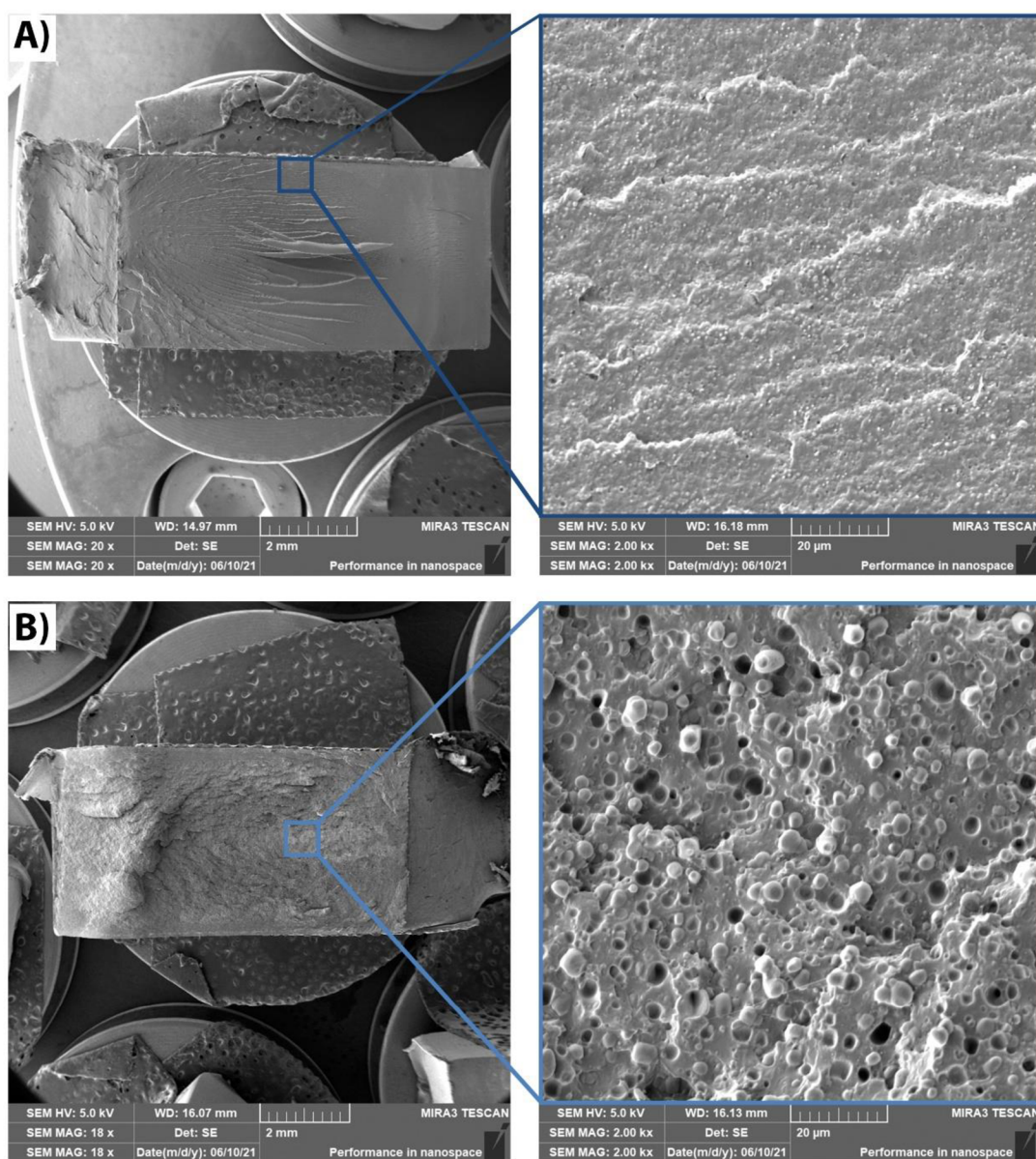
Na *obr. 3.20* jsou zobrazeny lomové plochy a jejich detaily pro rázově porušené binární PLLA/30TPE a ternární PLLA/30TPE/12.9EMA směsi při teplotě -40 °C. Z fraktografů obou lomových ploch je patrné, že jak binární směsi z *obr. 3.20* (A), tak ternární směsi z *obr. 3.20* (B) byly při teplotě -40 °C porušeny křehkým lomem. Z detailu povrchu porušených PLLA/30TPE vzorků je patrná jemná disperze TPE s nominální velikostí částic

900 nm. Pravděpodobným mechanismem, který vede ke zvýšení houževnatosti je mezifázová kavitace, která je spojena se separací fází při porušování. Jak uvádí Nagarajan a kol.[34], tento proces zabraňuje lokalizaci a šíření triaxiálního napětí a upřednostňuje tvorbu smykových pasů, které odpovídají kluzovým liniím v kovových materiálech. Lomová plocha ternární směsi na *obr. 3.20* (B) vykazuje mnohem hrubší strukturu porušení než binární směsi. Trhliny se v tomto případě nešířily primárně v ploše, ale v objemu a vznikalo tak mnoho nových povrchů, které pohlcovaly energii rázu. Z detailu lomové plochy ternárních směsí je možné pozorovat změnu morfologie TPE z částicové na vláknitou. Struktura TPE má tvar zploštěných vláken vlivem působícího rázového namáhání, která při pohlcování energie vedla k významnému nárůstu rázové houževnatosti (*viz obr. 3.12*).



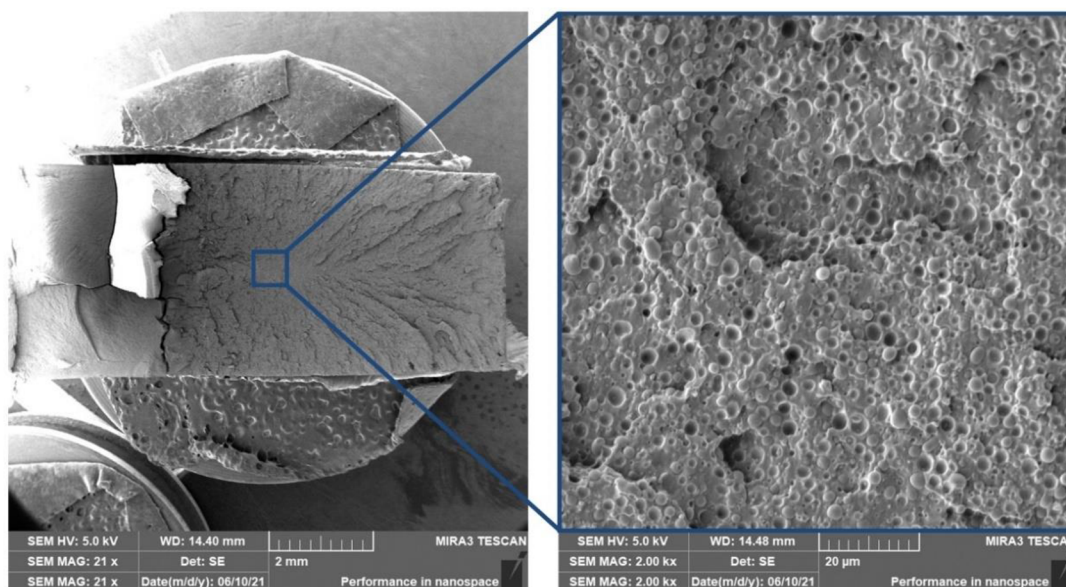
Obr. 3.21 Lomová plocha po rázové houževnatosti při -40 °C A) PLLA/30TPE, B) PLLA/30TPE/12,9EMA

Lomové plochy vzorků PLLA/30TPE a PLLA/30TPE/12.9EMA, které byly opatřeny vrubem a porušeny při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou zobrazeny na obr. 3.21. Binární vzorky s obsahem 30 % TPE na obr. 3.21 (A) vykazují křehký typ porušení s relativně hladkým povrchem, kde došlo k šíření trhliny v PLLA matrici bez výrazného pohlcování rázové energie disperzní fází TPE. U kompatibilizovaných ternárních vzorků na obr. 3.21 (B) lze pozorovat hrubší strukturu lomu a porušování na mezifázovém rozhraní PLLA/30TPE díky přísadce 12,9% EMA. Morfologie porušování ternárních vzorků s iniciovanou trhlinou potvrzuje výsledky vrubové houževnatosti z obr. 3.13, kde byla oproti binárním vzorkům pozorována zvýšená schopnost pohlcovat rázovou energii.



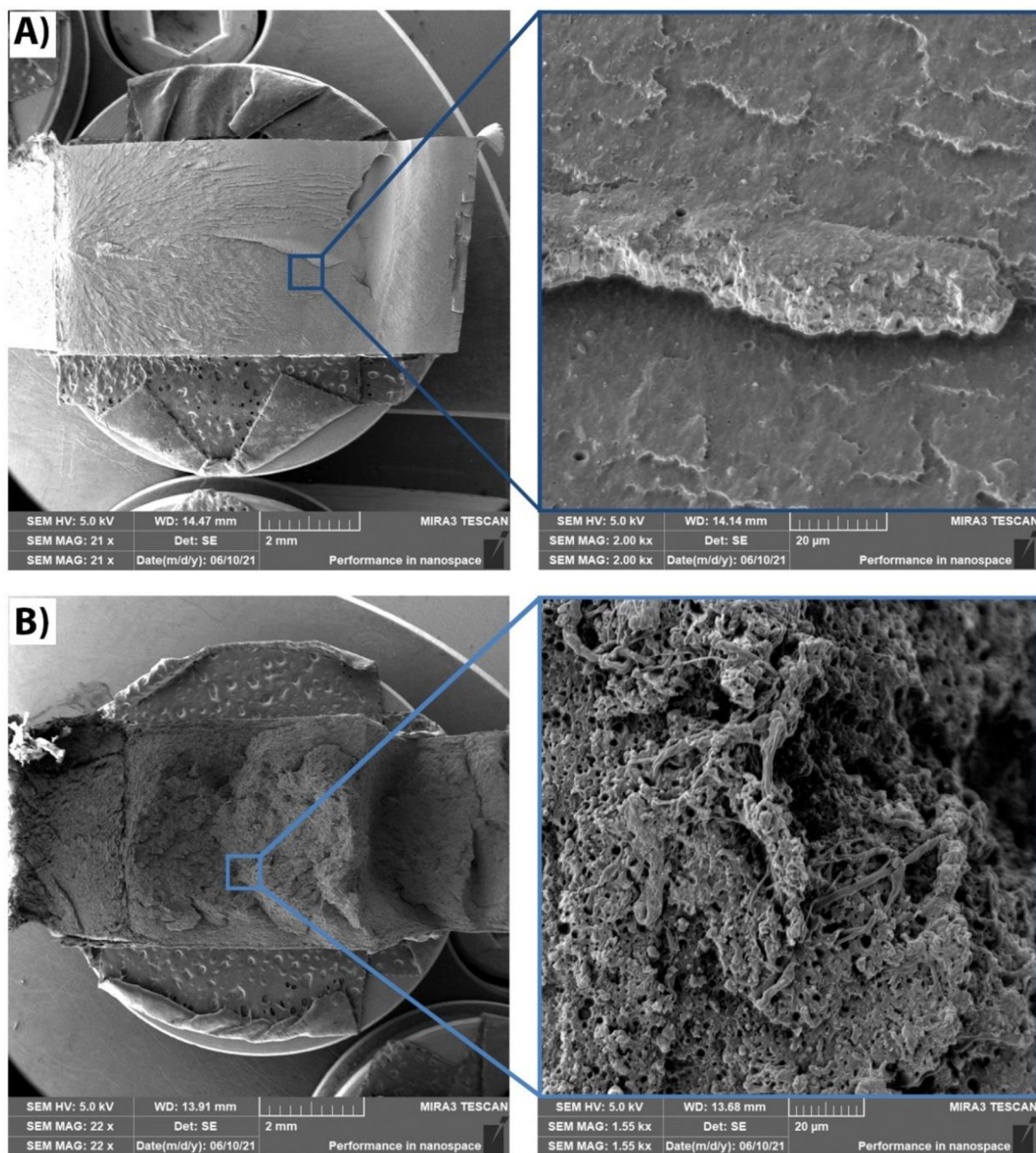
Obr. 3.22 Lomová plocha po vrubové houževnatosti při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ A) PLLA/30TPE, B) PLLA/30TPE/12,9EMA

Na *obr. 3.22* je zobrazena lomová plocha rázově porušené binární směsi PLLA/40TPE za teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Binární směs byla při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ porušena křehkým lomem s uplatněním mechanismů křehkování za vzniku nových ploch při šíření trhlin a jejich následné terminaci prostřednictvím kavitace TPE při pohlcování rázové energie. Ternární vzorky na bázi PLLA/40TPE/17,2EMA se i přes nízkou teplotu nepodařilo přerazit.



Obr. 3.23 Lomová plocha po rázové houževnatosti při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ PLLA/40TPE

Lomové plochy vzorků PLLA/40TPE a PLLA/40TPE/17,2EMA, které byly opatřeny vrubem a porušeny při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou zobrazeny na *obr. 3.23*. Binární vzorky s obsahem 40 % TPE na *obr. 3.23* (A) vykazují křehký typ porušení s relativně hladkým povrchem. Na detailu snímku lze pozorovat vláknitou strukturu TPE v lomové ploše, přiblížení této morfologie je uvedeno v příloze P7. U kompatibilizovaných ternárních vzorků na *obr. 3.23* (B) lze pozorovat velice hrubou strukturu lomu. Morfologie porušování ternárních vzorků na bázi PLLA/40TPE/17,2EMA s iniciovanou trhlinou vykazuje znaky ko-kontinuální struktury, která se plasticky deformovala i při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odpovídající množství plastické deformace bylo velice efektivní při rozptylování rázové energie i přes iniciovanou trhlinu, která ve výsledku vedla k výraznému zlepšení vrubové houževnatosti oproti nekompatibilizovaným vzorkům (*viz obr. 3.13*). Detail plastického porušení ko-kontinuální struktury je zobrazen v *příloze P8*.



Obr. 3.24 Lomová plocha po vrubové houževnatosti při -40 °C A) PLLA/40TPE, B) PLLA/40TPE/17,2EMA

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce byla optimalizace struktury kyseliny poly(L-mléčné) (PLLA) s bio termoplastickým elastomerem (TPE) v různém hmotnostním poměru. Pro zlepšení mezifázového rozhraní byl do směsi přidáván poly(ethylen–methylakrylát–glycidyl–methakrylát) (EMA) kompatibilizátor v hmotnostním poměru 70/30 (TPE/EMA). V první části byly kompaundací a následným vstříkáním vytvořeny zkušební tělesa. V druhé části byla provedena série zkoušek, která analyzovala: tahové charakteristiky, rázovou a vrubovou houževnatost a morfologii lomových ploch.

Z výsledků tahové zkoušky je patrné, že s rostoucím obsahem TPE a EMA se zvyšovala hodnota jmenovitého prodloužení při přetržení (ϵ_{tb}). Výrazný nárůst tažnosti oproti PLLA (5 %) nastal u vzorků PLLA/20TPE/8,6EMA, kde bylo naměřeno prodloužení ~227 %. Se zvýšením obsahu TPE na 40 % a EMA na 17,2 % došlo k nárůstu hodnoty ϵ_{tb} , až na 380 %. Mez pevnosti (σ_m) a modul pružnosti v tahu (E_t) dle předpokladu klesaly se zvyšujícím se obsahem TPE a EMA. Zajímavým zjištěním je trojnásobný nárůst E_t při zvýšení obsahu TPE z 30 % na 40 %. Z morfologické analýzy byl u těchto vzorků potvrzen přechod z částicové na vláknitou strukturu (viz obr. 4.1 a příloha P7).

Z výsledku rázové houževnatosti (a_{cU}) při 23 °C vyšlo najevo, že se zvyšujícím se obsahem TPE a EMA rostla rázová odolnost. Zajímavým zjištěním je, že hodnota rázové energie u vzorku PLLA/10TPE/4,3EMA byla 61,7 kJ/m². Tato hodnota překračuje limit superhouževnatých polymerních materiálů. Vzorky s obsahem nad 20 % TPE a 8,6 % EMA se již nepodařilo přerazit. Na základě tohoto zjištění byly vzorky podchlazeny na teplotu -40 °C. Z výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem TPE a EMA rostla a_{cU} exponenciálně. U binárních vzorků s obsahem 30 % TPE došlo k nárůstu a_{cU} oproti PLLA o ~260 %. S přidáním kompatibilizátoru se hodnota rázové houževnatosti zvýšila oproti PLLA přibližně 5násobně. Vzorky na bázi PLLA/40TPE/17,2EMA se ani při takto nízké teplotě nepodařilo přerazit. Proto byly vzorky podrobeny měření vrubové houževnatosti (a_{cA}) při teplotě -40 °C. Tato měření potvrdila významný vliv kompatibilizátoru na porušování směsí s iniciovanou trhlinou.

Z výsledků morfologické analýzy vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem TPE se struktura měnila z částicové na vláknitou. S přidavkem kompatibilizátoru byl zaznamenán nárůst velikosti částic TPE, zlepšení mezifázového rozhraní a postupný přechod na ko-kontinuální strukturu. Analýza lomových ploch potvrdila výsledky z rázové a vrubové houževnatosti při -40 °C.

Seznam literatury

- [1] Jak „zelené“ jsou nové biologicky rozložitelné a kompostovatelné plastové výrobky z biologických materiálů, které se nyní začínají používat? — Evropská agentura pro životní prostředí [online]. nedatováno [vid. 2021-06-23]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/articles/jak-201ezelene201c-jsou-nove-biologicky>
- [2] KROISOVÁ, Dora, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, a KATEDRA MATERIÁLU. *Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [3] *Polymery* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [4] HLADÍK, Petr. *Využití polymerů a jejich slitin v elektrotechnice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav a VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 978-80-7080-617-3.
- [6] *Biopolymers-Facts-Statistics-2018.pdf* [online]. [vid. 2021-02-26]. Dostupné z: https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/faltblaetter_broschueren/Biopolymers-Facts-Statistics-2018.pdf
- [7] EUBIO_ADMIN. Bioplastics. *European Bioplastics e.V.* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- [8] *EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf
- [9] EUBIO_ADMIN. Market. *European Bioplastics e.V.* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [10] STAFF, Creative Mechanisms. *Everything You Need to Know About Bioplastics* [online]. [vid. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-bioplastics>
- [11] VALEŠ, Petr. *Studie struktury a vlastností polymerních kompozitů na bázi PLA a kávové sedliny* [online]. Liberec, 2019. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153966/DP_Vales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [12] KUBÍČEK, Václav. *Charakterizace vyfukovaných fólií z měkčeného polylaktidu*. Brno, 2020. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] JAMSHIDIAN, Majid, Elmira Arab TEHRANY, Muhammad IMRAN, Muriel JACQUOT a Stéphane DESOBRY. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* [online]. 2010, **9**(5), 552–571. ISSN 1541-4337. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>
- [14] KUBÍ, Bc Václav. Ing. Radka Bálková, Ph.D. nedatováno, 66.
- [15] *Definice: Enantiomery* [online]. [vid. 2021-02-28]. Dostupné z: <http://www.chemeddl.org/resources/stereochem/definitions16.htm>
- [16] GUPTA, Bhuvanesh, Nilesh REVAGADE a Jöns HILBORN. Poly(lactic acid) fiber: An overview. *Progress in Polymer Science* [online]. 2007, **32**(4), 455–482. ISSN 0079-6700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005
- [17] RASAL, Rahul M., Amol V. JANORKAR a Douglas E. HIRT. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science* [online]. 2010, **35**(3), 338–356. ISSN 0079-6700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003
- [18] SVATÍK, Juraj. *STUDIUM PŘÍPRAVY EXPANDOVANÉ POLY(KYSELINY MLÉČNÉ)* [online]. Brno, nedatováno. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=146361
- [19] FIGALLA, Silvestr. *NOVÉ POSTUPY PŘÍPRAVY POLYMERŮ KYSELINY MLÉČNÉ*. Brno, 2018. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [20] VIDA, Mikuláš. *STUDIUM VYUŽITÍ ESTERŮ KYSELINY MLÉČNÉ PRO PŘÍPRAVU LAKTIDŮ A PLA* [online]. Brno, nedatováno. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=82922
- [21] EUBIO_ADMIN. Materials. *European Bioplastics e.V.* [online]. [vid. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>
- [22] *TPE | Polymerové typy - Resinex* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html>
- [23] *Rubber Technology* [online]. 1987 [vid. 2021-03-06]. ISBN 978-1-4615-7823-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7823-9>
- [24] LUBOŠ BĚHÁLEK a MATIN BORŮVKA. *Plasty v technické praxi a jejich vlastnosti*

- [25] WANG, Weiyu, Wei LU, Andrew GOODWIN, Huiqun WANG, Panchao YIN, Nam-Goo KANG, Kunlun HONG a Jimmy W. MAYS. Recent advances in thermoplastic elastomers from living polymerizations: Macromolecular architectures and supramolecular chemistry. *Progress in Polymer Science* [online]. 2019, **95**, 1–31. ISSN 0079-6700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2019.04.002
- [26] BRUDER, Ulf. *User's Guide to Plastic* [online]. 2. vyd. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019 [vid. 2021-04-19]. ISBN 978-1-56990-734-4. Dostupné z: doi:10.3139/9781569907351
- [27] MITTAL, Vikas, ed. *Functional polymer blends: synthesis, properties, and performances*. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5669-7.
- [28] PÖTSCHKE, Petra a D. R. PAUL. Formation of Co-continuous Structures in Melt-Mixed Immiscible Polymer Blends. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews* [online]. 2003, **43**(1), 87–141. ISSN 1532-1797, 1520-5746. Dostupné z: doi:10.1081/MC-120018022
- [29] FORTELNÝ, Ivan. *Řízení fázové struktury polymerních směsí: možnosti a problémy*. B.m., nedatováno. b.n.
- [30] ČSN EN ISO 179-1. Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s. Třídící znak 64 0612.
- [31] *SEM/EDS analýza – Průzkum umění cz* [online]. [vid. 2021-06-22]. Dostupné z: <http://pruzkumumeni.cz/metody-pruzkumu/sem-eds-analyza/>
- [32] DENG, Yixin, Changyi YU, Peangpatu WONGWIWATTANA a Noreen L. THOMAS. Optimising Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2018, **26**(9), 3802–3816. ISSN 1566-2543, 1572-8919. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-018-1256-x
- [33] WU, Souheng. Control of intrinsic brittleness and toughness of polymers and blends by chemical structure: a review. *Polymer International*. 1992, **29**(3), 229–247. ISSN 0959-8103.
- [34] NAGARAJAN, Vidhya, Amar K MOHANTY a Manjusri MISRA. Perspective on polylactic acid (PLA) based sustainable materials for durable applications: Focus on toughness and heat resistance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2016, **4**(6), 2899–2916. ISSN 2168-0485.

Seznam příloh

Příloha P1: Tabulky naměřených hodnot tahových vlastností jednotlivých směsí

Příloha P2: Tabulky naměřených hodnot rázových vlastností

Příloha P3: Tabulky naměřených hodnot vrubových vlastností

Příloha P4: Materiálový list PLLA Luminy L130

Příloha P5: Materiálový list TPE NP EL 208-65A

Příloha P6: Materiálový list EMA-GMA Sigma-Aldrich

Příloha P7: Detail lomové plochy vzorku PLLA/40TPE

Příloha P8: Detail lomové plochy vzorku PLLA/40TPE/17,2EMA

Příloha P1: Tabulky naměřených hodnot tahových vlastností jednotlivých směsí

PLLA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ε_{tb} [%]
1	4,06	10,22	3662	73,7	4,9
2	4,05	10,2	3565	74,8	5,7
3	4,06	10,2	3495	72,5	3,2
4	4,04	10,19	3666	74,4	6,2
5	4,06	10,21	3572	73,7	3,6
6	4,04	10,21	3569	75,1	5,8
7	4,03	10,2	3614	73,7	5,8
8	4,02	10,22	3583	73,5	5,3
9	4,08	10,23	3542	72,1	4,8
10	4,03	10,22	3545	72,4	4,9
průměr	4,05	10,21	3581	73,6	5,0
Směrodatná odchylka	0,02	0,01	51	1	0,9

PLLA/10TPE					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ε_{tb} [%]
1	4,06	10,22	3174	58,1	3,4
2	4,06	10,2	3139	60,3	3,3
3	4,06	10,24	3087	58,3	2,8
4	4,06	10,18	3161	60	2,8
5	4,07	10,22	3202	57,1	2,7
6	4,05	10,22	3174	59,8	3,1
7	4,05	10,22	3181	59,1	3,4
8	4,06	10,16	3069	57,7	2,9
9	4,07	10,18	3039	58,9	3
10	4,07	10,21	3191	57,2	2,8
průměr	4,06	10,21	3142	58,7	3,0
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	54	1,1	0,3

PLLA/10TPE/4,3EMA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ε_{tb} [%]
1	4,08	10,21	2808	50	7,2
2	4,08	10,2	2775	49,8	10,4
3	4,06	10,21	2782	47,9	8,8
4	4,07	10,23	2711	50,1	3,6
5	4,07	10,22	2725	47,1	16,6
6	4,06	10,18	2814	51,9	7,3
7	4,06	10,21	3524	49,9	13
8	4,07	10,2	3011	51,5	10,1
9	4,07	10,2	2889	50,1	5,6
10	4,05	10,18	2743	50,8	4,4
průměr	4,07	10,20	2878	49,9	8,7
Směrodatná odchylka	0,01	0,01	231	1,4	3,8

PLLA/20TPE					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,07	10,2	1832	41,9	12,1
2	4,09	10,2	2233	44,3	3,2
3	4,09	10,22	2076	40,5	3,9
4	4,09	10,24	1938	40,7	24,3
5	4,1	10,22	2072	41,8	6,5
6	4,08	10,21	1980	40,6	8,3
7	4,07	10,19	2100	42,8	4,8
8	4,09	10,21	2056	41,3	12,9
9	4,09	10,19	1600	40,9	21,7
10	4,09	10,2	1929	40,7	10,8
průměr	4,09	10,21	1982	41,6	10,9
Směrodatná odchylka	0,01	0,01	165	1,2	6,9

PLLA/20TPE/8,6EMA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,08	10,21	1497	31,9	262
2	4,08	10,19	1635	31,4	227
3	4,08	10,21	1512	31,1	244,8
4	4,09	10,18	1641	31,4	138,3
5	4,09	10,21	1597	31,7	244,2
6	4,09	10,21	1583	31,3	234,9
7	4,09	10,18	1539	30,6	241,2
8	4,08	10,2	1533	31,7	226,7
9	4,08	10,21	1582	31,2	205,3
10	4,08	10,19	1553	31,5	246,3
průměr	4,09	10,20	1567	31,4	227
Směrodatná odchylka	0,01	0,01	46,4	0,3	32,9

PLLA/30TPE					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,08	10,24	51	18,5	268,8
2	4,09	10,18	52	19,7	280,8
3	4,08	10,21	52	15,6	229
4	4,08	10,19	89	18,7	251,7
5	4,09	10,2	89	11,7	238,4
6	4,08	10,23	70	18,1	265,2
7	4,09	10,18	63	14,5	231,8
8	4,09	10,2	59	17,7	270,5
9	4,08	10,22	81	19	259,6
10	4,08	10,2	54	15,3	247,8
průměr	4,08	10,21	66	16,9	254,4
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	14,6	2,4	16,6

PLLA/30TPE/12,9EMA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,06	10,1	137	18,5	274,3
2	4,05	10,12	120	17,5	250,7
3	4,05	10,12	127	19,1	282,4
4	4,06	10,07	124	17,5	260,3
5	4,05	10,14	90	19,1	289,3
6	4,06	10,1	123	18,9	259,8
7	4,05	10,13	118	19,1	275,6
8	4,06	10,12	129	18,1	281,4
9	4,05	10,12	122	17,8	261,9
10	4,06	10,1	116	18,4	277,1
průměr	4,06	10,11	121	18,4	271,3
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	12	0,6	11,7

PLLA/40TPE					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,05	10,13	202	15,9	221,1
2	4,06	10,13	205	17,3	247,9
3	4,06	10,12	209	15,4	216,8
4	4,07	10,13	191	17,9	272,8
5	4,07	10,13	158	17,8	271,9
6	4,07	10,12	187	16,1	236,5
7	4,06	10,13	195	15,8	231,8
8	4,07	10,13	204	17,4	265,4
9	4,06	10,13	208	17,6	240,9
10	4,06	10,13	190	17,6	253,7
průměr	4,06	10,13	195	16,9	245,9
Směrodatná odchylka	0,01	0,01	14	0,9	19,0

PLLA/40TPE/17,2EMA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1	4,05	10,14	109	13,3	356,4
2	4,05	10,14	101	13,2	359,4
3	4,05	10,14	111	13,7	393,3
4	4,04	10,15	108	13,4	395,5
5	4,04	10,14	112	13,7	398,1
6	4,05	10,14	105	13,6	360,8
7	4,05	10,14	110	13,3	375,4
8	4,04	10,15	108	13,5	391,9
9	4,05	10,14	112	13,7	379,1
10	4,04	10,14	107	13,3	394,8
průměr	4,05	10,14	108	13,5	380,5
Směrodatná odchylka	0,01	0,00	3	0,2	15,7

Příloha P2: Tabulky naměřených hodnot rázových vlastností

PLLA				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,23 mm		Průměrná šířka (b): 10,34 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,12 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	0,80	19,17	1,12	26,29
2	0,85	20,36	1,07	25,12
3	0,85	20,36	1,15	26,99
4	0,83	19,89	1,07	25,12
5	0,85	20,36	1,13	26,53
6	0,78	18,69	1,09	25,59
7	0,80	19,17	1,08	25,35
8	0,82	19,65	1,06	24,88
9	0,83	19,89	1,14	26,76
10	0,81	19,41	1,13	26,53
průměr	0,82	19,69	1,10	25,92
Sm. odchylka	0,02	0,58	0,03	0,78

PLLA/10TPE				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,21 mm		Průměrná šířka (b): 10,18 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,09 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	1,22	29,22	1,17	27,96
2	1,15	27,54	1,25	29,95
3	1,20	28,74	1,28	30,67
4	1,10	26,34	1,30	31,15
5	1,12	26,82	1,24	29,71
6	1,17	28,02	1,20	28,75
7	1,02	24,43	1,24	29,71
8	1,14	27,30	1,18	28,27
9	1,23	29,45	1,17	28,03
10	1,13	27,06	1,28	30,67
průměr	1,15	27,49	1,23	29,49
Sm. odchylka	0,06	1,49	0,05	1,17

PLLA/10TPE/4,3EMA				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,18 mm		Průměrná šířka (b): 10,18 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	2,30	55,38	1,46	34,90
2	2,48	59,71	1,38	32,98
3	2,87	69,10	1,28	30,59
4	3,12	75,12	1,81	43,26
5	3,01	72,47	2,12	50,67
6	2,27	54,65	1,80	43,02
7	2,47	59,47	2,02	48,28
8	2,64	63,56	1,48	35,37
9	2,20	52,97	1,61	38,48
10	2,25	54,17	1,74	41,59
průměr	2,56	61,66	1,67	39,91
Sm. odchylka	0,34	8,07	0,28	6,60

PLLA/20TPE				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,21 mm		Průměrná šířka (b): 10,18 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,09 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	1,74	41,67	1,27	30,35
2	2,12	50,77	1,69	40,39
3	1,90	45,50	1,67	39,91
4	1,84	44,06	1,45	34,66
5	1,94	46,46	1,57	37,52
6	2,20	52,68	1,72	41,11
7	1,84	44,06	1,20	28,68
8	1,64	39,27	1,66	39,68
9	1,99	47,65	1,30	31,07
10	2,20	52,68	1,71	40,87
průměr	1,94	46,48	1,52	36,42
Sm. odchylka	0,19	4,53	0,20	4,83

PLLA/20TPE/8,6EMA				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,21 mm		Průměrná šířka (b): 10,18 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,07 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	N	250,00	1,87	45,13
2	N	250,00	1,77	42,72
3	N	250,00	1,96	47,31
4	N	250,00	2,13	51,41
5	N	250,00	2,20	53,10
6	N	250,00	1,97	47,55
7	N	250,00	2,18	52,62
8	N	250,00	2,32	55,99
9	N	250,00	2,18	52,62
10	N	250,00	1,74	42,00
průměr	–	250,00	2,03	49,04
Sm. odchylka	–	0	0,20	4,79

PLLA/30TPE				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,21 mm		Průměrná šířka (b): 10,18 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,09 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	N	250,00	3,41	81,94
2	N	250,00	3,21	77,13
3	N	250,00	2,73	65,60
4	N	250,00	4,86	116,78
5	N	250,00	5,21	125,19
6	N	250,00	2,94	70,65
7	N	250,00	3,41	81,94
8	N	250,00	4,32	103,81
9	N	250,00	5,17	124,23
10	N	250,00	3,91	93,95
průměr	–	250,00	3,92	94,12
Sm. odchylka	–	0	0,92	22,18

PLLA/30TPE/12,9EMA				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,13 mm		Průměrná šířka (b): 10,14 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,10 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,06 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	N	250,00	6,87	166,88
2	N	250,00	5,30	128,74
3	N	250,00	4,89	118,78
4	N	250,00	5,93	144,04
5	N	250,00	5,02	121,94
6	N	250,00	6,10	148,17
7	N	250,00	5,58	135,54
8	N	250,00	6,23	151,33
9	N	250,00	5,24	127,28
10	N	250,00	4,99	121,21
průměr	–	250,00	5,62	136,39
Sm. odchylka	–	0	0,65	15,78

PLLA/40TPE				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,17 mm		Průměrná šířka (b): 10,17 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m^2]
1	N	250,00	6,71	161,71
2	N	250,00	6,36	153,28
3	N	250,00	7,15	172,32
4	N	250,00	6,60	159,06
5	N	250,00	9,33	224,85
6	N	250,00	8,20	197,62
7	N	250,00	n	N
8	N	250,00	n	N
9	N	250,00	n	N
10	N	250,00	n	N
průměr	–	250,00	7,39	178,14
Sm. odchylka	–	0	1,15	27,74

PLLA/40TPE/17,2EMA				
Vzorky	23 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 10,18 mm		Průměrná šířka (b): 10,16 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,06 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,05 mm	
	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m ²]	E_c [J]	a_{cU} [kJ/m ²]
1	N	N	N	N
2	N	N	N	N
3	N	N	N	N
4	N	N	N	N
5	N	N	N	N
6	N	N	N	N
7	N	N	N	N
8	N	N	N	N
9	N	N	N	N
10	N	N	N	N
průměr	–	–	–	–
Sm. odchylka	–	–	–	–

Příloha P3: Tabulky naměřených hodnot vrubových vlastností

Vzorky	PLLA		PLLA/10TPE	
	-40 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 8 mm		Průměrná šířka (b): 8 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,12 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
E_c [J]	a_{cA} [kJ/m ²]	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m ²]	
1	0,095	2,88	0,131	3,98
2	0,101	3,06	0,121	3,68
3	0,092	2,79	0,108	3,28
4	0,095	2,88	0,117	3,56
5	0,094	2,85	0,102	3,10
průměr	0,10	2,89	0,12	3,52
Sm. odchylka	0,00	0,10	0,01	0,34

Vzorky	PLLA/10TPE/4,3EMA		PLLA/20TPE	
	-40 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 8 mm		Průměrná šířka (b): 8 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,11 mm	
	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]
1	0,138	4,20	0,124	3,77
2	0,140	4,26	0,130	3,95
3	0,137	4,17	0,128	3,89
4	0,141	4,29	0,120	3,65
5	0,145	4,41	0,123	3,74
průměr	0,14	4,26	0,13	3,80
Sm. odchylka	0,00	0,09	0,00	0,12

Vzorky	PLLA/20TPE/8,6EMA		PLLA/30TPE	
	-40 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 8 mm		Průměrná šířka (b): 8 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,06 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm	
	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]
1	0,239	7,36	0,214	6,556
2	0,254	7,82	0,219	6,710
3	0,262	8,07	0,220	6,740
4	0,251	7,73	0,240	7,353
5	0,259	7,97	0,199	6,097
průměr	0,17	5,10	0,21	6,44
Sm. odchylka	0,01	0,30	0,02	0,53

Vzorky	PLLA/30TPE/12,9EMA		PLLA/40TPE	
	-40 °C		-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 8 mm		Průměrná šířka (b): 8 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,07 mm		Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm	
	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]
1	0,161	4,94	0,210	6,43
2	0,155	4,76	0,232	7,11
3	0,165	5,07	0,200	6,13
4	0,181	5,56	0,188	5,76
5	0,169	5,19	0,221	6,77
průměr	0,25	7,79	0,22	6,69
Sm. odchylka	0,01	0,27	0,01	0,45

Vzorky	PLLA/40TPE/17,2EMA	
	-40 °C	
	Průměrná šířka (b): 8 mm	
	Průměrná tloušťka (h): 4,08 mm	
	E_c [J]	a_{cA} [kJ/m^2]
1	0,320	9,877
2	0,289	8,920
3	0,294	9,074
4	0,264	8,148
5	0,312	9,630
průměr	0,30	9,13
Sm. odchylka	0,02	0,67

Příloha P4: Materiálový list PLLA Luminy L130

Product Data Sheet

Luminy® L130

Revision date 07 May 2019
 Page 1 of 3
 Date previous version 01 Sep 2017
 Version & language 7/0972 - EN
 Product availability Global
 Product status Commercial

PRODUCT DATA SHEET
 LUMINY® L130

Interested in solutions for bioplastics? Please contact us at
www.total-corbion.com pla@total-corbion.com

DESCRIPTION

PLA is a biobased polymer derived from natural resources and offers a significant reduction in carbon footprint compared to oil-based plastics. Luminy® L130 is a high heat, medium flow PLA homopolymer suitable for injection molding and fiber spinning. Compared to standard PLA, these PLA homopolymers have higher melting points and an increased rate of crystallization. As a result, compounds containing PLA homopolymers are suitable for the production of semi-crystalline parts, which exhibit a higher temperature resistance.

TYPICAL PROPERTIES¹

Physical properties	Method	Typical value
Density	Literature value	1.24 g/cm ³
Melt flow index	ISO 1133-A (210°C/2.16kg)	23 g/10 min
Melt flow index	ISO 1133-A (190°C/2.16kg)	10 g/10 min
Stereochemical purity	Total Corbion PLA method	≥ 99% (L-isomer)
Appearance	Visual	Crystalline white pellets
Residual monomer	Total Corbion PLA method	≤ 0.3%
Water / moisture	Coulometric Karl-Fischer	≤ 400 ppm
Melting temperature	DSC	175°C
Glass transition temperature	DSC	60°C
Mechanical properties	Method	Typical value
Tensile modulus	ISO 527-1	3500 MPa
Tensile strength	ISO 527-1	50 MPa
Elongation at break	ISO 527-1	≤ 5%
Charpy notched impact, 23°C	ISO 179-1eA	≤ 5 kJ/m ²
Heat deflection temp, amorphous ²	ISO 75-1	60°C
Heat deflection temp, crystalline ²	ISO 75-1	105°C

¹ Typical properties, not to be interpreted as specifications

² HDT B, 0.45MPa flatwise. HDT depends on processing conditions. For crystalline resins, formulation included 3-7% nucleating agent (Luminy® D070) and molding took place in a 90-100°C tool.

PROCESSING INFORMATION & RECOMMENDATIONS

PLA homopolymers and PLA compounds can be processed on conventional injection molding equipment. To prevent or reduce the degradation of PLA during processing, it is recommended to use a barrel with a content of 3-5 times the shot weight, a (general purpose) screw with a L/D ratio of at least 20:1 and if applicable low shear hotrunners in the mold. Pre-drying of the resin is recommended.

Start-up and shutdown

- The equipment needs to be well cleaned and purged to prevent cross contamination.
- At the start of the run it is recommended to purge the system with a polyolefin or a purging compound (e.g. Dyna-Purge, Clean LDPE) followed by purging with the PLA homopolymer or PLA compound at its processing conditions.
- At the completion of the run it is recommended to purge the system using a purging compound again.

Injection molding processing recommendations	
Predrying	4-6 hours at 100°C
Throat	20-40°C
Feed zone	155-175°C
Compression zone	180-220°C
Metering zone	180-220°C
Nozzle	180-220°C
T _{exit}	180-220°C
T _{melt, amorphous}	20-30°C
T _{melt, crystalline}	90-100°C
Back pressure (Bar, specific)	50-100 bar
Screw speed	As slow as possible

Typical settings, may require optimization



© Copyright 2019 Total Corbion PLA. All rights reserved. No part of this publication may be copied, downloaded, reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form by any means, electronic, mechanical, photocopying, recorded or otherwise, without permission of the publisher. No representation or warranty is made as to the truth or accuracy of any data, information or opinions contained herein or as to their suitability for any purpose, condition or application. None of the data, information or opinions herein may be relied upon for any purpose or reason. Total Corbion PLA disclaims any liability, damages, losses or other consequences suffered or incurred in connection with the use of the data, information or opinions contained herein. In addition, nothing contained herein shall be construed as a recommendation to use any products in conflict with existing patents covering any material or its use. TOTAL is a trademark owned and registered by Total S.A., used under license by Total Corbion PLA BV. CORBION is a trademark owned and registered by CORBION NV, used under license by Total Corbion PLA BV.

TCF-PDS-LUMINY L130-V7/0972-EN-10/2017

Příloha P5: Materiálový list TPE NP EL 208-65A



Revision date 21/12/2017

TECHNICAL DATA SHEET

NATUREPLAST NP EL 208-65A

TPE

Injection molding

General properties

NP EL 208-65A reference is a **biodegradable** thermoplastic elastomer according to EN13432:2000 standard.

NP EL 208-65A is dedicated to injection molding applications.

	Method	Unit	Value*
General properties			
<i>Density</i>	ASTM D792	/	1.18
Mechanical properties			
<i>Hardness</i>	ASTM D2240	Shore A	65
<i>Tear strength (unnotched)</i>	ASTM D624	KN/m	40
<i>Tensile strength</i>	ASTM D638	MPa	8
<i>Elongation at break (molding direction)</i>	ASTM D638	%	800
<i>Abrasion resistance</i>	DIN 53516	mm ³	175

*Typical values for reference only which do not have to be considered as specifications



NaturePlast® • 11 Rue François Arago - 14123 Ifs • Tél : +33 (0)2 31 83 50 87 • Fax : +33 (0)2 31 84 70 98
www.natureplast.eu
SAS au capital de 174 666 € APE : 4690Z • SIRET : 493 442 891 00047 • TVA : FR 45 49 344 2891

Příloha P6: Materiálový list EMA-GMA Sigma-Aldrich

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

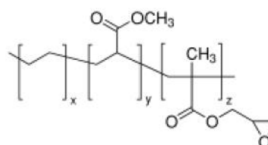
Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Poly(ethylene-co-methyl acrylate-co-glycidyl methacrylate) - pellets

Product Number: 433640
CAS Number: 51541-08-3
MDL: MFCD00217719
Formula: C₁₃H₂₀O₅

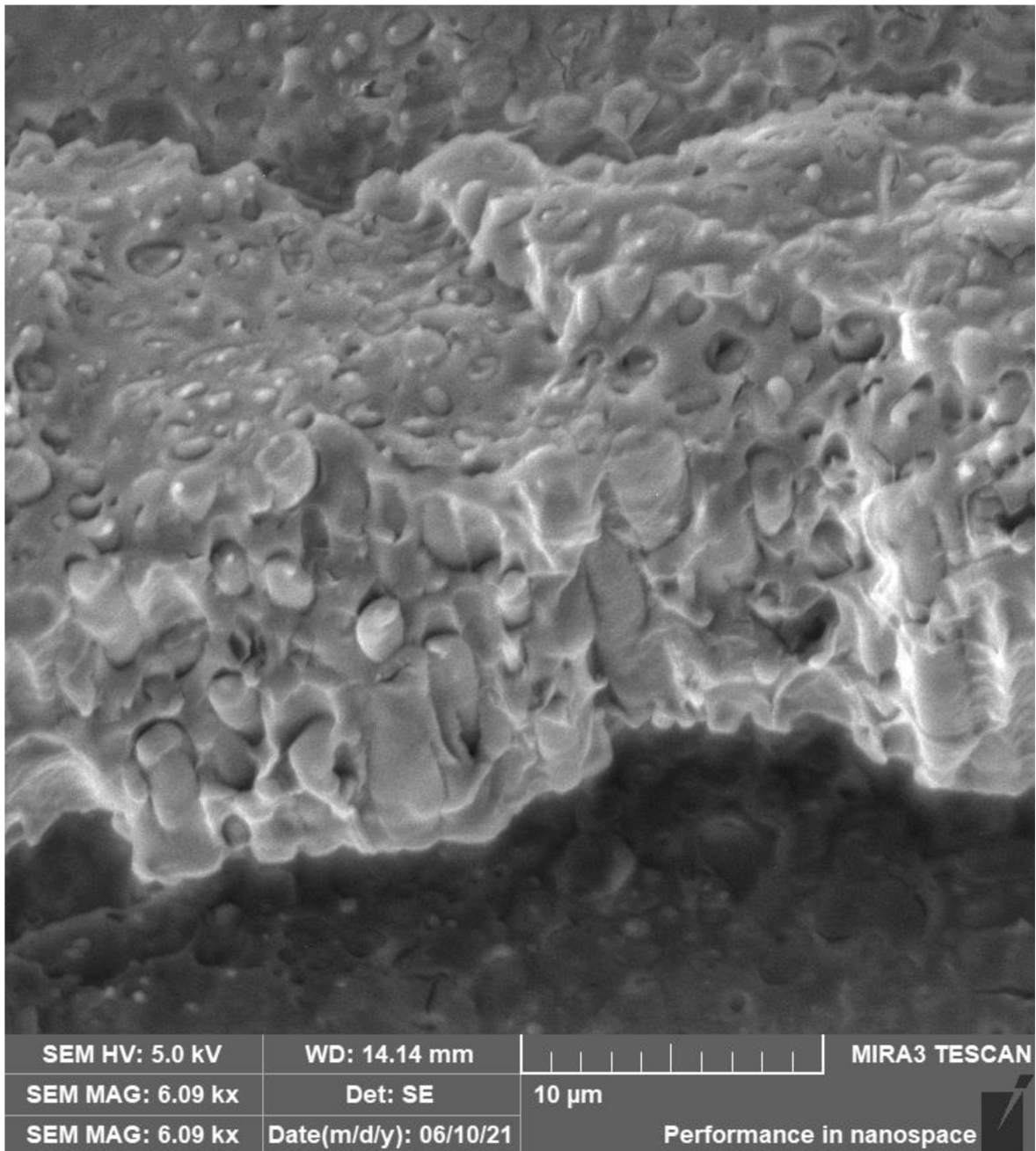


TEST	Specification
Appearance (Color)	Colorless
Appearance (Form) Liquid or Pellets	Conforms to Requirements
Infrared spectrum	Conforms to Structure
Miscellaneous Assay Melt Index (g/10 min)	4.00 - 8.00
Assay Methyl Acrylate	22.0 - 28.0 %
Miscellaneous Assay Glycidyl Methacrylate	7.00 - 9.00 %

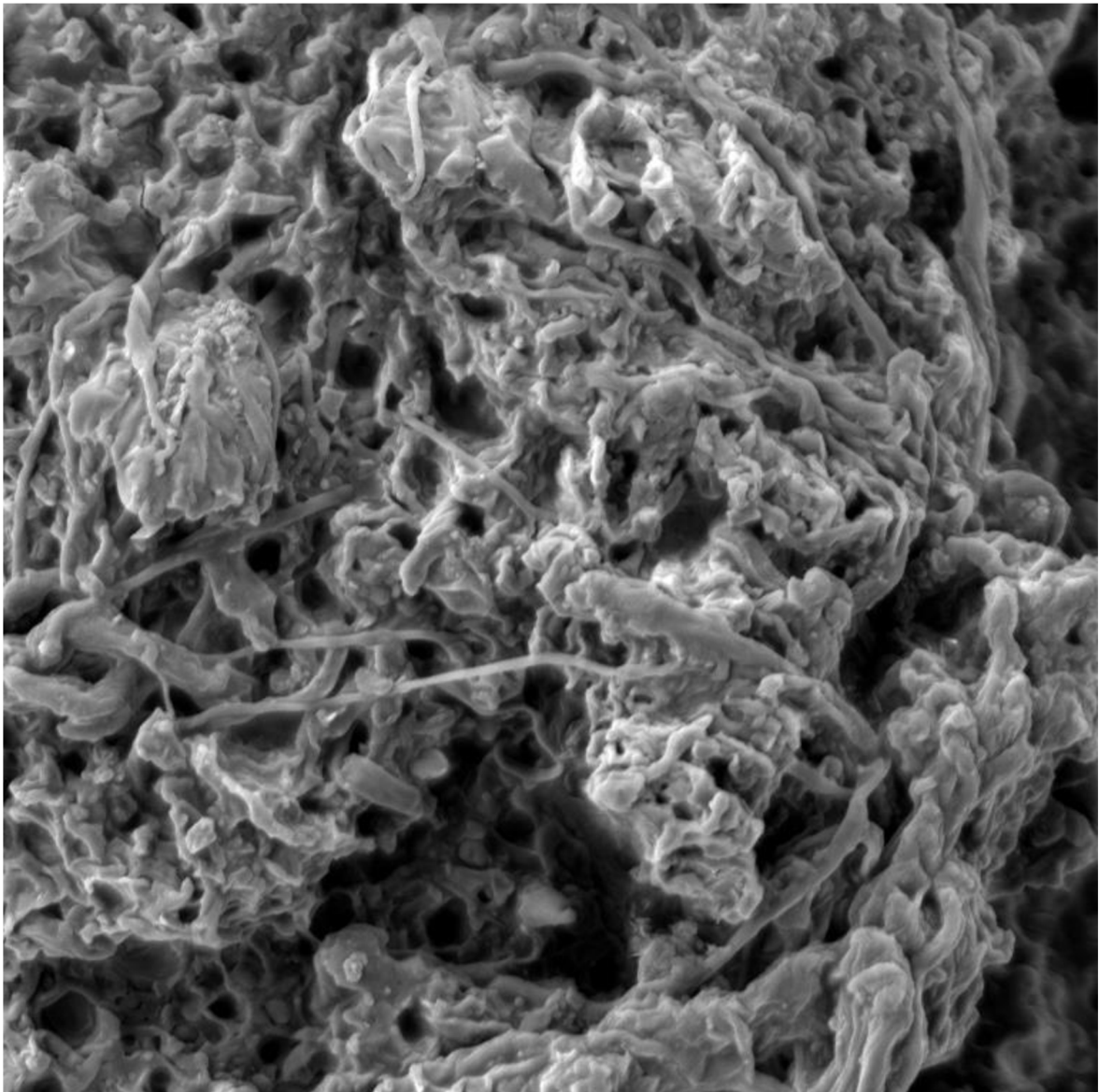
Specification: PRD.0.ZQ5.10000038811

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

Příloha P7: Detail lomové plochy vzorku PLLA/40TPE



Příloha P8: Detail lomové plochy vzorku PLLA/40TPE/17,2EMA



SEM HV: 5.0 kV	WD: 13.67 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 3.63 kx	Det: SE	10 μ m	
SEM MAG: 3.63 kx	Date(m/d/y): 06/10/21	Performance in nanospace	