

# Neizotermní krystalizace směsí lineárního a větveného polypropylenu

Jakub Ovesný

---

Bakalářská práce  
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Jakub Ovesný</b>
Osobní číslo:	<b>T18062</b>
Studijní program:	<b>B2808 Chemie a technologie materiálů</b>
Studijní obor:	<b>Polymerní materiály a technologie</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Neizotermní krystalizace směsí lineárního a větveného polypropylenu</b>

## Zásady pro vypracování

Běžný lineární polypropylen se vyznačuje nízkou pevností taveniny, proto se špatně zpracovává např. technologií vyfukování či zpěňování. Pevnost taveniny se značně zvýší zavedením větví na hlavní řetězec. Tato úprava molekulové struktury má však vliv na krystalizační chování. Větvený polypropylen například krystalizuje při vyšší teplotě. Tato práce se zaměří na studium krystalizace směsí lineárního a větveného polypropylenu při neizotermních podmínkách. K tomuto účelu se použije zejména diferenciální snímací kalorimetrie.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. J. Varga. Crystallization, Melting and Supermolecular Structure of Isotactic Polypropylene. In: J. Karger-Kocsis. Polypropylene: Structure, Blends and Composites, vol. 1. London: Chapman & Hall, 1995.
2. M. Rätzsch. Reaction mechanism to long-chain branched PP. Journal of Macromolecular Science ? Pure and Applied Chemistry, 1999, 36:1759.
3. J. Tian, W. Yu, Ch. J. Zhou. Crystallization behaviors of linear and long chain branched polypropylene. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104:3592.
4. Z. Su, H. Wang, J. Dong, X. Zhang, X. Dong, Y. Zhao, J. Yu, Ch. C. Han, D. Xu, D. Wang. Conformation transition and crystalline phase variation of long chain branched isotactic polypropylenes (LCB-iPP). Polymer, 2007, 48:870.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2022

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá neizotermní krystalizací směsí lineárního a větveného polypropylenu. Krystalizační chování čistých polypropylenů a různých jejich směsí (1, 2, 5, 10, 20, 50 *hm. %* větveného polypropylenu v lineárním polypropylenu) při různých rychlostech chlazení bylo sledováno pomocí diferenciální snímací kalorimetrie (DSC). Zejména byl sledován vliv složení směsi a rychlosti chlazení na charakteristické teploty tání a krystalizace a také krystalinitu. Pozorována byla rovněž morfologie kontrolovaně zkrystalizovaných vzorků. Bylo zjištěno, že přidavek polypropylenu s dlouhými větvemi do lineárního polypropylenu vede ke zvýšení teploty krystalizace. Všechny směsi dosahovaly vyšší teploty tání než čisté materiály, totéž platí také pro stupeň krystalinity.

Klíčová slova: polypropylen, polypropylen s dlouhými větvemi, neizotermní krystalizace, DSC

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with non-isothermal crystallization of linear and long-chain branched polypropylene blends. The crystallization behaviour of pure polypropylenes and their various blends (1, 2, 5, 10, 20, 50 wt. % branched polypropylene in linear polypropylene) at different cooling rates was observed by differential scanning calorimetry (DSC). In particular, the effect of blend composition and cooling rate on the characteristic melting and crystallization temperatures and crystallinity was studied. The morphology of controlled crystallized samples was also observed. It has been found that the addition of long-chain branched polypropylene into linear polypropylene leads to an increase in the crystallization temperature. All blends show the higher melting temperature than neat polypropylenes, the same trend was observed also in case of crystallinity.

Keywords: polypropylene, long-chain branched polypropylene, non-isothermal crystallization, DSC

## **PODĚKOVÁNÍ**

V první řadě bych chtěl poděkovat své vedoucí práce Ing. Janě Navrátilové, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a za podporu při tvorbě mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat Jiřině Dohnalové za pomoc na hot stage a při tvorbě vzorků.

A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POLYPROPYLEN</b> .....	<b>12</b>
1.1 STEREOIZOMERIE PP .....	12
1.1.1 Izotaktický polypropylen .....	13
1.1.2 Ataktický polypropylen.....	14
1.1.3 Syndiotaktický polypropylen .....	14
1.2 KRYSTALIZACE .....	14
1.2.1 Proces krystalizace .....	14
1.2.2 Krystalová struktura a mikrostruktura .....	15
1.3 POLYMORFIE IZOTAKTICKÉHO POLYPROPYLENU .....	17
1.3.1 $\alpha$ fáze.....	17
1.3.2 $\beta$ fáze .....	18
1.3.3 $\gamma$ fáze .....	18
1.3.4 Smektická fáze .....	18
<b>2 POLYPROPYLEN S DLOUHÝMI VĚTVEMI</b> .....	<b>19</b>
2.1 SMĚSI LINEÁRNÍHO A VĚTVENÉHO POLYPROPYLENU .....	20
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>21</b>
<b>3 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍPRAVA VZORKŮ</b> .....	<b>22</b>
3.1 POLYPROPYLEN.....	22
3.2 PŘÍPRAVA SMĚSÍ.....	22
3.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	23
3.3.1 Vzorky na analýzu diferenciální snímací kalorimetrie .....	23
3.3.2 Vzorky na mikroskopickou analýzu.....	23
3.4 METODY ANALÝZY .....	24
3.4.1 Diferenciální snímací kalorimetrie.....	24
3.4.2 Skenovací elektronová mikroskopie .....	24
<b>4 VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>25</b>
4.1 NEIZOTERMNÍ KRYSTALIZACE .....	25
4.2 TÁNÍ KONTROLOVANĚ KRYSTALIZOVANÝCH VZORKŮ.....	31
4.3 KRYSTALINITA .....	38
4.4 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (SEM).....	40
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>50</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>51</b>

<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>54</b>



## ÚVOD

Polypropylen (PP) je syntetický, semikrystalický polymer. Patří do skupiny polyolefinů, což jsou homopolymery či kopolymery alkenů. Pro výrobu polypropylenu se využívá propen neboli propylen. Je to typický termoplast, který lze opakovaně převádět z tuhého do plastického stavu. [1]

Polyolefiny zaujímají ve spotřebě dominantní pozici. Jsou cenově dostupné a lehce zpracovatelné. Poprvé byl polypropylen připraven v polovině 20. století a v 60. až 70. letech 20. století jeho produkce stoupla až o 25 %. V dnešní době probíhá u polypropylenu rychlý vývoj a následná optimalizace vlastností, vyvíjí se celá řada typů a jeho komerční využití v obalovém či automobilovém průmyslu postupně roste. [2,3]

Komerčně se izotaktický polypropylen vyrábí polymerací za přítomnosti Ziegler-Natta katalyzátorů. Jejím výsledkem je vysokomolekulární produkt s pravidelnou strukturou. [4] Polypropylen tvoří tři základní stereoizomery lišící se polohou methylové skupiny navázané na hlavním řetězci. Je to izotaktický, syndiotaktický a ataktický polypropylen. [5] Polypropylen je významný tím, že může existovat v různých morfologických modifikacích závislých na takticitě polymeru a podmínkách krystalizace. [6] Popsáno bylo několik krystalických forem, a to  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  či smektická fáze. Nejvýznamnějšími jsou právě  $\alpha$  a  $\beta$  fáze.  $\alpha$  fáze vzniká při běžných zpracovatelských podmínkách a tvoří monoklinickou krystalovou mřížku. [7] Tvoří se při ochlazení polymerní taveniny a z roztoku. [8]  $\beta$  fáze vzniká spontánně při krystalizaci ve smykovém poli nebo v teplotním gradientu. [9] Tvoří trigonální krystalovou mřížku. [10] Vzniká hlavně při přidání  $\beta$  nukleačního činidla do polypropylenu. [6]

Pro optimalizaci vlastností polypropylenu v široké škále využití se používá směs lineárního polypropylenu a polypropylenu s dlouhými větvemi. [11] Polypropylen s dlouhými větvemi neboli LCB-PP je možno vytvořit několika způsoby. Například ozářením vysokoenergetickým paprskem či pomocí peroxidů. [12] Polypropylen s dlouhými větvemi je významný hlavně tím, že zvyšuje pevnost taveniny polymeru. [13]

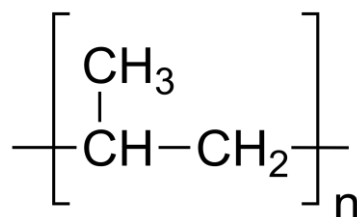
Zavedením LCB-PP do lineárního PP se změní reologické a mechanické vlastnosti a zlepšuje se zpracovatelnost hlavně při vyfukování, tvarování a při výrobě pěny. Vytváření směsi také ovlivňuje krystalizační chování a výslednou morfologii výrobku. [11, 14]

Úkolem této bakalářské práce je zhodnotit morfologickou strukturu, tepelné vlastnosti a krystalinitu lineárního polypropylenu a směsí lineárního a větveného polypropylenu. K těmto účelům byly využity metody diferenciální snímací kalorimetrie (studium tepelného chování) a skenovací elektronové mikroskopie (studium morfologie).

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

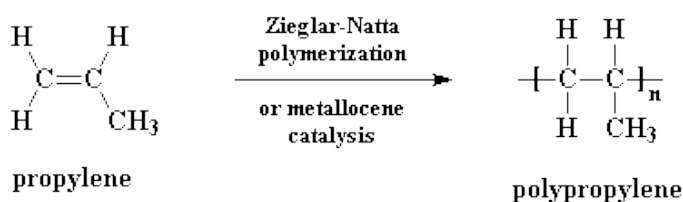
## 1 POLYPROPYLEN

Polypropylen (PP) je semikrystalický, syntetický polymerní materiál (Obrázek 1). Jedná se o termoplast patřící do skupiny polyolefinů. Polyolefiny jsou homopolymery a kopolymery olefinů neboli alkenů. Alkeny jsou nenasyčené uhlovodíkové sloučeniny, které obsahují v molekule jednu dvojnou vazbu. [1] V případě PP to je propen neboli propylen. Ten se obvykle získává v plynné podobě, jako vedlejší produkt rafinace ropy. [6]



Obrázek 1 Chemická struktura polypropylen [15]

Polypropylen byl poprvé připraven Johnem Paulem Hoganem a Robertem Banksem v roce 1951. [4] Byl to ale jen ataktický, nízkomolekulární produkt parafinického charakteru. [1] V roce 1954 byl poté stereoselektivní polymerací za přítomnosti Ziegler Natta katalyzátorů připraven vysokomolekulární izotaktický polypropylen s pravidelnou strukturou (Obrázek 2). Objevili ho Giulio Natta a Karl Rehn. [4] Od té doby se polypropylen stal významným polymerem s mnohostranným použitím. Natta zdůvodnil rozdíly ve vlastnostech různých polypropylenů prostorovým uspořádáním substituentů. [5] U polypropylenů je substituentem methylová skupina CH<sub>3</sub>. [16]



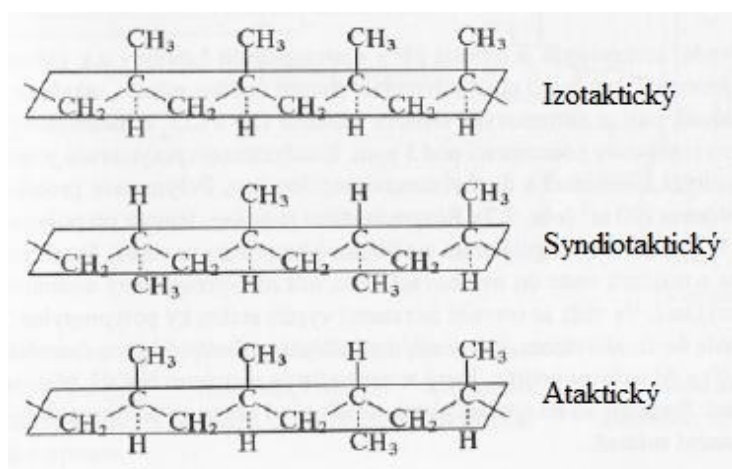
Obrázek 2 Výroba polypropylen [17]

### 1.1 Stereoizomerie PP

Jestliže při polymerační reakci jsou použity Ziegler-Natta, nebo metallocenové katalyzátory, budou vznikat vysoce stereospecifické produkty. Molekuly propylenů se na vznikající polymerní řetězec vážou jen v konkrétní orientaci. [6] Je to z důvodu asymetrie monomeru,

který má několik možností připojení do polymerního řetězce. [3] Dochází tedy k postupnému prodlužování polymerního řetězce, přičemž nedochází k ataku uhlíku methylové skupiny, což by poté vedlo k větvení řetězce. [6]

Molekuly propylenu se mohou za sebe řadit třemi způsoby: hlava-pata, hlava-hlava, pata-pata. Ze sterického hlediska je nejvýhodnější formou hlava-pata. Výsledkem je vysoce pravidelný polymerní řetězec polypropylenu. Polypropylen může být poté izotaktický, syndiotaktický nebo ataktický (Obrázek 3). O tom rozhoduje orientace methylové skupiny navázané na hlavním řetězci. [3]



Obrázek 3 Stereoizomery PP [18]

Stereoregularitu polypropylenu je možné určit podle tzv. indexu izotakticity, který je udáván v hm. %. Tento index označuje podíl polypropylenu nerozpustný ve vroucím heptanu. Ve vroucím heptanu či v jiných alifatických uhlovodících např. v hexanu je totiž rozpustný ataktický PP, stereoblokový PP s ataktickými a izotaktickými segmenty řetězce i nízkomolekulární izotaktický PP. [5]

### 1.1.1 Izotaktický polypropylen

U izotaktického polypropylenu (iPP) jsou methylové skupiny ve stejné konfiguraci a jsou umístěny na stejné straně polymerního řetězce, jestliže je řetězec brán jako lomená čára v rovině. [16] Řetězec izotaktického PP zaujímá šroubovicový tvar. Jeden závit této šroubovice je tvořen třemi monomery a má tedy tzv. ternární symetrii. Methylové skupiny iPP jsou vždy pootočeny o 120°. Šroubovice pak může být levotočivá, či pravotočivá a methylová skupina může směřovat šikmo nahoru, či dolů. [10] Tyto řetězce jsou tedy velmi

pravidelné makromolekulární látky schopny krystalizace. Izotaktický PP má pak vysoký stupeň krystalinity. [16]

### 1.1.2 Ataktický polypropylen

U ataktického polypropylenu (aPP) mají methylové skupiny statistickou distribuci konfigurací. [5] Substituent je tedy umístěn na obou stranách polymerního řetězce. Sousední řetězce se tím pádem nemohou k sobě těsněji přiblížit a nemohou tedy krystalizovat. Výsledkem je zcela amorfní materiál, který za pokojové teploty připomíná lepkavou medovitou kapalinu. [16]

### 1.1.3 Syndiotaktický polypropylen

U syndiotaktického polypropylenu (sPP) jsou methylové skupiny v opačné konfiguraci vzhledem k polymernímu řetězci. Substituent je umístěn střídavě na obou stranách polymerního řetězce. Syndiotaktický polypropylen je v dnešní době připravován s použitím metallocenových katalyzátorů. [6] Zatím je však ale příliš drahý na to, aby našel významnější aplikace. Tento druh polypropylenu také krystalizuje, tak jako izotaktický polypropylen. [16]

## 1.2 Krystalizace

Krystalizovatelnost řetězce je kritickým faktorem, který řídí výslednou morfologii polymeru. [10] Polypropylen je semikrystalický lineární polymer s krystalinitou 60–75 %. [5] To, že je PP semikrystalický znamená, že do krystalických oblastí se uloží jen část polymerní taveniny. Zbytek materiálu tvoří amorfní fázi, která krystalické oblasti obklopuje. [16] Aby mohlo dojít ke krystalizaci, musí mít řetězce schopnost těsného a hustého uložení v pravidelném paralelním uspořádání. Buď jsou řetězce planární neboli rovinné v tzv. „zig-zag“ tvaru nebo jsou ve tvaru šroubovice. Dalším předpokladem krystalizace je stereoregularita řetězců. Jak již bylo zmíněno, krystalizují izotaktické a syndiotaktické formy PP, ataktické nikoliv. [10]

### 1.2.1 Proces krystalizace

Krystalizace polymeru započne při teplotě krystalizace polymeru, když tavenina materiálu tuhne nebo když se odpaří rozpouštědlo. Dochází k postupnému odvodu tepla z taveniny, což způsobí, že pohyb polymerních řetězců se zpomalí a polymerní tavenina se stane viskóznější. Vznikají tak uspořádané, supramolekulární krystalické oblasti s

neuspořádanými amorfními částmi. Tvoří se jak jednoduché monokrystaly ze zředěných roztoků, tak i složité sférolity z tavenin. [10]

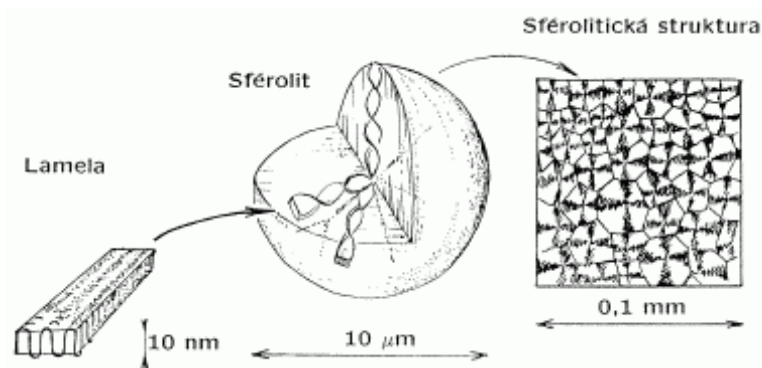
Růst krystalů může být čistě spontánní. Spontánní krystalizace probíhá tehdy, když je struktura molekul vhodná k vytvoření velmi uspořádané struktury. Dále může být růst krystalů vyvolán přítomností cizích částic v tavenině polymeru. Jsou to například různá nukleační činidla či povrch částice kovu.

Rychlost krystalizace závisí na rychlosti nukleace a na rychlosti růstu krystalů. Při chlazení polymerní taveniny se zvyšuje rychlost nukleace, zatímco rychlost růstu krystalů se snižuje. Krystalizace je obecně lepší při pomalejším stupni ochlazování polymerní taveniny.

Stupeň krystalizace lze řídit rychlostí ochlazování taveniny a následným temperováním. Velmi vysoká rychlost chlazení může snížit stupeň krystalizace. Krystalinita vychází z molekulární struktury. Případné nedokonalosti polymerního řetězce jako je větvení či přítomnost kopolymerů mohou limitovat stupeň krystalinity. Výslednou krystalinitu PP lze ovlivnit přítomností aditiv, katalyzátorů či procesními podmínkami. [6]

### 1.2.2 Krystalová struktura a mikrostruktura

Při krystalizaci polypropylen vytváří velmi uspořádanou krystalovou strukturu (Obrázek 4). Nejmenší krystalová jednotka je jednotková buňka. Jednotkové buňky mají souběžné strany (kubická, tetragonální, hexagonální...), jsou tedy geometricky pravidelné a mají velikosti v nanometrech. V polymerní látce se jednotkové krystalové buňky opakují milionkrát v třídímním prostoru krystalové struktury. Polypropylenový řetězec má spirální prostorové uspořádání. Spirální uspořádání vzniká z důvodu objemného bočního substituentu čímž je methylová skupina. Objemná methylová skupina pak také způsobuje těsnější přimknutí jednotlivých polymerních řetězců blízko sebe tak, aby nedocházelo k narušení vazby po délce řetězce. [6]



Obrázek 4 Krystalická struktura polypropylenu [19]

### ***Lamely***

Lamely jsou tenké, deskovité či páskové útvary s vysoce uspořádanou strukturou. Jednotlivé spirálové řetězce polypropylenu jsou schopny se skládat tam a zpět a vytvářet tak uspořádané útvary. [6] Polymerní řetězce jsou složeny z jednotlivých segmentů, které se k sobě skládají antiparalelně. Dva sousední segmenty jedné molekuly tvoří sklad. Jednotlivé sklady tvoří rovinu skladu a ohyby řetězců tvoří povrch skladů. Vzdálenost protilehlých ohybů řetězce se označuje jako perioda skládání, která určuje tloušťku krystalu. A sektor krystalu se stejnou orientací rovin skladů se označuje za doménu skladů. [10]

Typická tloušťka lamely je 2–50 nm. Šířka je asi 10 μm. [6] Z jednotlivých lamel mohou makromolekulární řetězce vystupovat, procházet amorfní fází a mohou se pak zapojit do dalších lamel. Tyto vazebné molekuly jsou pak důležité pro soudržnost polymerního materiálu. [16] Spojovací body mezi lamelami poskytují materiálu flexibilitu a nárazovou odolnost pro krystalické oblasti. Polymer, který má větší množství těchto spojovacích uzlů bývá obecně pevnější. Naopak při jejich příliš velkém množství je materiál spíše křehký, málo houževnatý a má malou odolnost vůči nárazu. [6]

Celková velikost a kvalita lamel závisí na rychlosti krystalizace. Při vyšší rychlosti krystalizace mají lamely větší množství defektů a jsou tenčí. [10]

### ***Hedrity***

Hedrity neboli axiolity jsou polykrystalické útvary tvořeny z bočně nedokonale vyvinutých lamel. Tyto lamely směřují do prostoru ze společného primárního zárodku, anebo častěji jsou uloženy na obě strany společné roviny. Hedrity mají tvar mnohostěnu. Tvoří se jen u vybraných druhů polymerů těsně pod rovnovážnou teplotou tání za velmi pomalých krystalizačních teplot. [10]

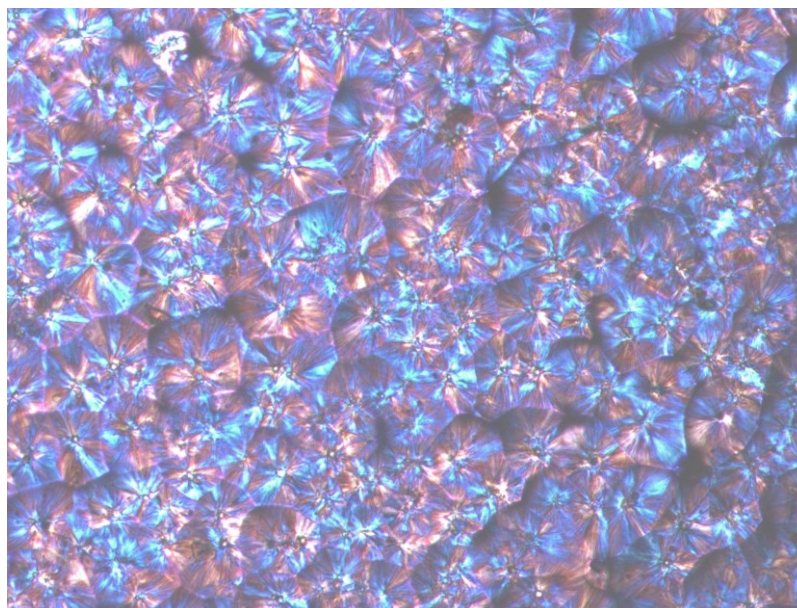
### ***Sférolity***

Sférolity jsou krystalické, středově souměrné útvary. Vznikají tak, že z centrálního zárodku (monokrystalu) rostou paprskovitě všemi směry krystalické lamely jako úzké stuhy někdy pravidelně vrtulovitě stočené. Sférolitická struktura pak vzniká na průniku sférolitů. [16]

Sférolity krystalizují hlavně z taveniny, pokud má tavenina dostatek času na krystalizaci. Dále sférolity vznikají z koncentrovaných roztoků polymerů. Při růstu jsou jednotlivé



sférolity kulovité a jakmile dojde k jejich setkání, mění se na mnohostěny. [10] V optickém mikroskopu je pak možné pozorovat tzv. Maltézkého kříže (Obrázek 5). [6]



Obrázek 5 Maltézké kříže lineárního polypropylenu

Teplota krystalizace, kdy rychlost růstu dosahuje maxima, je zhruba mezi teplotou skelného přechodu  $T_g$  a rovnovážnou teplotou tání  $T_m$ . [8] Velikost sférolitů je nepřímo úměrná koncentraci krystalizačních zárodků a obvykle se velikost pohybuje od 1 do 50  $\mu m$ . [10, 6] Větší množství krystalizačních zárodků poskytuje přítomnost nukleačního činidla. Vznikají pak menší a četnější sférolity. Jako nukleační činidla mohou být použity např. organické sloučeniny či soli kovů. [6]

### 1.3 Polymorfie izotaktického polypropylenu

Polypropylen je významný tím, že může existovat v různých morfologických modifikacích záviselých na takticitě polymeru a podmínkách krystalizace. [6] Různé morfologické modifikace se liší molekulárním uspořádáním polymerních řetězců. [4] Dále morfologická fáze závisí na podmínkách krystalizace jako je tlak, teplota a rychlost chlazení. Odlišné fáze mohou koexistovat a jedna polymorfnní fáze se může přeměnit na druhou při změně podmínek. [6]

#### 1.3.1 $\alpha$ fáze

Alfa fáze izotaktického polypropylenu vzniká při běžných zpracovatelských podmínkách a je to primárně vznikající forma iPP. [7] Vzniká při ochlazování taveniny a z roztoku. [8]

Alfa fáze je stabilní forma iPP, [10] tvoří monoklinickou krystalovou mřížku a jednotlivé polymerní řetězce mají tvar spirály. [7] Převládá radiální růst lamel o tloušťce 5–20 nm. [6] U lamel dochází k větvení, které se nazývá („cross-hatched“), kdy tyto struktury poté tvoří sférolity. Sférolity jsou tedy tvořeny tangenciálními lamelami, které jsou propojeny radiálními lamelami. [10]

### 1.3.2 $\beta$ fáze

Beta fáze izotaktického PP tvoří trigonální krystalovou mřížku. Za běžných teplot je to metastabilní forma. Sférolity  $\beta$  fáze jsou tvořeny radiálními lamelami. [10] Lamely  $\beta$  fáze jsou uloženy paralelně a nevykazují větvení „cross-hatch“. Spontánně je preferován vznik  $\beta$  fáze při krystalizaci ve smykovém poli nebo v teplotním gradientu. Rychlost růstu  $\beta$  fáze je větší než rychlost růstu  $\alpha$  fáze mezi teplotami 100–140 °C. [9]

Pro efektivní tvorbu  $\beta$  fáze se do polypropylenu přidávají tzv.  $\beta$  nukleační činidla. Při opětovném zahřátí může tato krystalická struktura rekrystalizovat a vzniká poté  $\alpha$  fáze. [6]

### 1.3.3 $\gamma$ fáze

Gama fáze tvoří orthorombickou krystalovou mřížku. Může vznikat při krystalizaci taveniny homopolymeru za vysokého tlaku nebo při krystalizaci polypropylenových frakcí o nízké molární hmotnosti. Může vznikat také u PP připraveného pomocí metalocenových katalyzátorů, jelikož polymerní řetězec obsahuje jisté chyby ve své struktuře. [11] Za atmosférického tlaku vzniká primárně  $\alpha$  fáze, za zvyšujícího tlaku koexistují jak  $\alpha$  fáze tak  $\gamma$  fáze a za tlaku kolem 200 MPa bude  $\gamma$  fáze dominantní. [6]

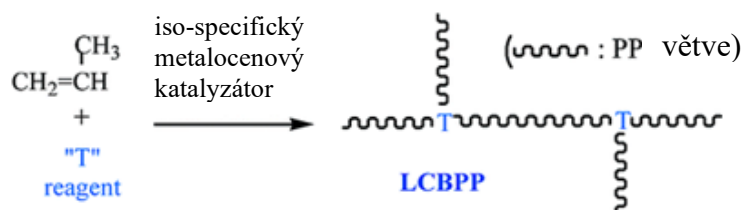
### 1.3.4 Smektická fáze

Smektická neboli mezomorfní fáze tvoří přechodovou fázi mezi amorfní a krystalickou fází. Vzniká hlavně při prudkém zchlazení polymerní taveniny. Tato forma může vznikat v důsledku deformací a defektů krystalové mřížky. Jednotlivé atomy mohou být například vytlačeny z krystalové mřížky, polymerní řetězec může být špatně poskládan, mřížka může obsahovat cizí atomy. [6]

## 2 POLYPROPYLEN S DLOUHÝMI VĚTVEMI

Při výrobě polypropylenu s dlouhými větvemi (LCB-PP) je potřeba zavést boční větve na hlavní polymerní řetězec (Obrázek 6). Změní se tak vlastnosti polymerní taveniny, zejména se zvýší pevnost taveniny, tedy elongační viskozita. V praxi se tento typ polypropylenu označuje jako HMS PP – High Melt Strength polypropylene. [13]

Větve mohou být zavedeny na hlavní řetězec více způsoby, a to např. polymerací in situ v reaktoru, dále úpravou hotového polypropylenu ozářením vysokoenergetickým paprskem, či pomocí peroxidů. Metoda využití peroxidů si získala velkou oblibu v průmyslu hlavně díky své cenové dostupnosti. [12] Je založena na radikálovém mechanismu, dehydrogenaci terciárního uhlíku podél uhlovodíkového řetězce polypropylenu. Dehydrogenací řetězce iPP vznikají makroradikály, které jsou schopny reakce s monomerními jednotkami za tvorby větví. Ke zlepšení větvících reakcí lze použít thiouramové disulfidové sloučeniny, kterými lze vytvořit reverzibilní radikály. Proces lze také upravit změnou radikálového meziprojektu pomocí derivátů furanu a styrenu. [20]



Obrázek 6 Výroba LCB-PP [13]

Po zavedení dlouhých větví do struktury PP se změny reologické a mechanické vlastnosti materiálu, čímž se dají vyřešit problémy zpracovatelnosti materiálu, zejména dochází ke zlepšení elongační viskozity, a tedy pevnosti taveniny. Materiál se pak snadněji zpracovává vyfukováním a tvarováním. Vysoká elongační viskozita je také důležitá při výrobě pěny. Zavedením dlouhých větví se mění také krystalizační chování, např. klesá krystalinita. Rychlost růstu krystalů je u větveného polymeru nižší v důsledku nepravidelnosti řetězce způsobené právě místy rozvětvení. Nicméně celková rychlost krystalizace je pozorována větší, což je připisováno samonukleaci. [11, 14]

Všeobecně je přijímán fakt, že LCB-PP může sloužit jako nukleační činidlo a urychluje krystalizaci PP. Vzniklá morfologie je tvořena velmi malými krystalitami. Byla též zjištěna zvýšená tendence ke krystalizaci do  $\gamma$  fáze. [13]

## 2.1 Směsi lineárního a větveného polypropylenu

Přípravou směsí lineárního a větveného polypropylenu je možné kombinovat vlastnosti obou typů a připravit tak materiál vhodný pro daný způsob zpracování. Navíc použitím specifického nukleačního činidla lze dále ovlivnit konečné vlastnosti směsi. [11]

Dá se očekávat, že přidavek větveného polypropylenu do lineárního ovlivní kinetiku krystalizace i nadmolekulární strukturu, tedy velikost krystalitů a jejich polymorfní složení. Obecně LCB-PP krystalizuje do  $\alpha$  fáze a má i zvýšenou tendenci tvořit  $\gamma$  fázi. V práci Gajzlerové a spol. [11] bylo zjištěno, že teplota tání u směsí s rostoucím obsahem LCB-PP nejprve roste asi do obsahu 10 % LCB-PP a poté se snižuje. Teplota krystalizace se pak zvyšuje s rostoucím množstvím LCB-PP ve směších. Vyšší teplota krystalizace u směsí je způsobena vyšší rychlostí nukleace (samonukleací) LCB-PP, naopak rychlost růstu je menší než u lineárního PP z důvodu přítomnosti defektů v řetězcích v místech větvení. Celková krystalinita směsí byla pozorována mírně vyšší než 50 % nezávisle na složení směsí. Krystalinita LCB-PP a směsí, kde LCB-PP převládá, je obecně nižší, což je připisováno defektům, které omezují skládání polymerního řetězce. [11]

Podle Tabatabaei a spol. [21] se celková krystalinita směsí L-PP a LCB-PP postupně zvyšuje s malými přídávky LCB-PP do L-PP. Po přidávání dalšího LCB-PP do směsi poté dochází naopak ke snižování celkové krystalinity. [21]

Směsi L-PP a LCB-PP vykazují i zajímavé reologické vlastnosti. V mnoha studiích bylo zjištěno, že morfologie pěn je jednodušší u směsi lineárního a větveného polypropylenu než u čistého L-PP. Směsi s malým množstvím přidaného LCB-PP též vykazovaly výrazné deformační zpevnění (strain hardening).

Předpokládá se, že molekulová hmotnost složek, množství LCB-PP ve směsi a větvená struktura LCB-PP (stromová či hvězdicová) ovlivňují mísitelnost směsí lineárního a větveného polypropylenu. Bylo zjištěno, že směsi LCB-PP a L-PP s nízkou molekulovou hmotností vykazovaly mísitelnost. Naopak směsi L-PP s vysokou molekulovou hmotností a vysokým obsahem větveného polypropylenu vykazovaly nemísitelnost. [22]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍPRAVA VZORKŮ

#### 3.1 Polypropylen

V této práci byly použity dva druhy polypropylenu firmy Borealis (Viedeň, Rakousko). Lineární polypropylen byl zastoupen typem Borclean HC310BF (ITT 3,3 g/10 min, 230 °C, 2,16 kg, ISO 1133). Jako polypropylen obsahující dlouhé větve byl vybrán typ Daploy WB140HMS (ITT 2,1 g/10 min, 230 °C, 2,16 kg, ISO 1133). Podobné hodnoty indexu toku taveniny byly určující pro výběr právě těchto dvou typů polypropylenu. Další důležité informace o daných materiálech jsou uvedeny v materiálových listech v Příloze 1 a 2. [23]

#### 3.2 Příprava směsí

Z lineárního a větveného polypropylenu byly vyrobeny směsi s různým poměrem složek (viz Tabulka 1). Pelety dvou druhů polypropylenů byly nejprve smíchány manuálně a poté byly dávkovány do dvoušnekového vytlačovacího stroje Brabender PL-2000 Plasti-Corder. Teploty jednotlivých zón při vytlačování byly nastaveny takto:  $T_1 = 190\text{ °C}$ ,  $T_2 = 200\text{ °C}$ ,  $T_3 = 210\text{ °C}$ . Rychlost otáček dvoušneku byla 60 otáček/min. Celková hmotnost jednotlivých směsí vždy činila 3 000 g. [23]

Tabulka 1 Složení jednotlivých směsí

	LCB-PP		L-PP	
	Hmotnostní %	Hmotnost [g]	Hmotnostní %	Hmotnost [g]
L-PP	0	0	100	3 000
Směs 1	1	30	99	2 970
Směs 2	2	60	98	2 940
Směs 5	5	150	95	2 850
Směs 10	10	300	90	2 700
Směs 20	20	600	80	2 400
Směs 50	50	1 500	50	1 500
LCB-PP	100	3 000	0	0

### 3.3 Příprava vzorků

Z jednotlivých vyrobených směsí byly připraveny primární vzorky o rozměrech 100x100x0,5 mm lisováním v ručním lisu při teplotě 210 °C po dobu 5 min. Chlazení probíhalo v hydraulickém lisu při teplotě 60 °C po dobu 5 min. [23]

#### 3.3.1 Vzorky na analýzu diferenciální snímací kalorimetrie

Z vylisovaných desek byly vystřiženy vzorky o přibližné hmotnosti 3 mg. Ty byly umístěny do hliníkových pánviček o objemu 40  $\mu$ l, přikryty hliníkovou pokličkou a byly uzavřeny v ručním lisu Mettler Toledo. Nakonec byla poklička propíchnuta špendlíkem. Vzorky pak byly umístěny do přístroje diferenciální snímací kalorimetrie s podavačem vzorků.

#### 3.3.2 Vzorky na mikroskopickou analýzu

Z desek jednotlivých primárních vzorků byly vystřiženy čtverečky asi 1x1 cm. Tyto vzorky byly vloženy postupně mezi dvě separační PET fólie a byly vloženy do vyhřátého ručního lisu. Lis byl vyhřátý na 200 °C a proces lisování trval 1 min. Ze vzniklých tenkých fólií o tloušťce přibližně 0,04 mm byly postupně vystřiženy vzorky o velikosti 1x1 cm a byly vloženy na krycí sklíčka. Ta byla vložena na vyhřívaný stolek. Nejprve byly vzorky roztaveny na teplotu 220 °C, následovalo setrvání na této teplotě 5 min a poté byly vzorky ochlazeny rychlostmi 2 a 10 °C/min na teplotu 25 °C.

Tyto kontrolovaně zkrystalizované vzorky byly poté leptány 1% roztokem  $\text{KMnO}_4$  v koncentrované  $\text{H}_3\text{PO}_4$  pro odstranění amorfni fáze. Jednotlivé vzorky polymerů byly vloženy i se sklíčkem do ethanolu, aby došlo k odmaštění vzorku. Vzorek byl vysušen a vložena na Petriho misku do 1% roztoku manganistanu draselného v koncentrované kyselině fosforečné po dobu jedné hodiny, opláchnuty čistou vodou. Poté byly vzorky ponořeny do peroxidu vodíku na 5 min. Nakonec byly vzorky znovu opláchnuty v čisté vodě. Následně byly vzorky pokoveny slitinou zlata a paladia. Následovala analýza struktury pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

### 3.4 Metody analýzy

Pro analýzu neizotermní krystalizace a vzniklé nadmolekulární struktury byly použity metody diferenciální snímací kalorimetrie a skenovací elektronové mikroskopie.

#### 3.4.1 Diferenciální snímací kalorimetrie

Pro kontrolovanou neizotermní krystalizaci a následné tání připravených směsí byl použit diferenciální snímací kalorimetr DSC1 Mettler Toledo, USA. Při měření byla do komory přístroje zavedena dusíková atmosféra s průtokem 20 ml/min. Teplotní program obsahoval šest cyklů s různými rychlostmi chlazení (2, 5, 10, 20, 40) °C/min. Každý cyklus se poté skládal z následujících kroků. Nejprve se vzorek zahříval z teploty 25 °C na 220 °C. Na této teplotě následovalo setrvání po dobu 5 min pro odstranění teplotní historie. Rychlost ohřevu byla vždy 10 °C/min. Poté se vzorek chladil různými rychlostmi na 25 °C, na této teplotě pak následovala prodleva 1 min pro vyrovnání teplot a ohřev na teplotu 190 °C opět rychlostí 10 °C/min pro sledování tepelného chování kontrolovaně zkrystalizovaných vzorků. Získaná data byla zpracována pomocí STARe Evaluation Software.

#### 3.4.2 Skenovací elektronová mikroskopie

Pro studium morfologie vzniklé při kontrolované neizotermní krystalizaci byl využit snímací elektronový mikroskop Phenom Pro (Thermo Fisher Scientific Inc., USA). Vzorky byly před započítím charakterizace pokoveny tenkou vrstvou slitiny zlata a paladia pomocí naprašovačky SC7620 Mini (Quorum Technologies, Velká Británie).



## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Provedené analýzy poskytly informace o tepelném chování vzorků a o nadmolekulární struktuře.

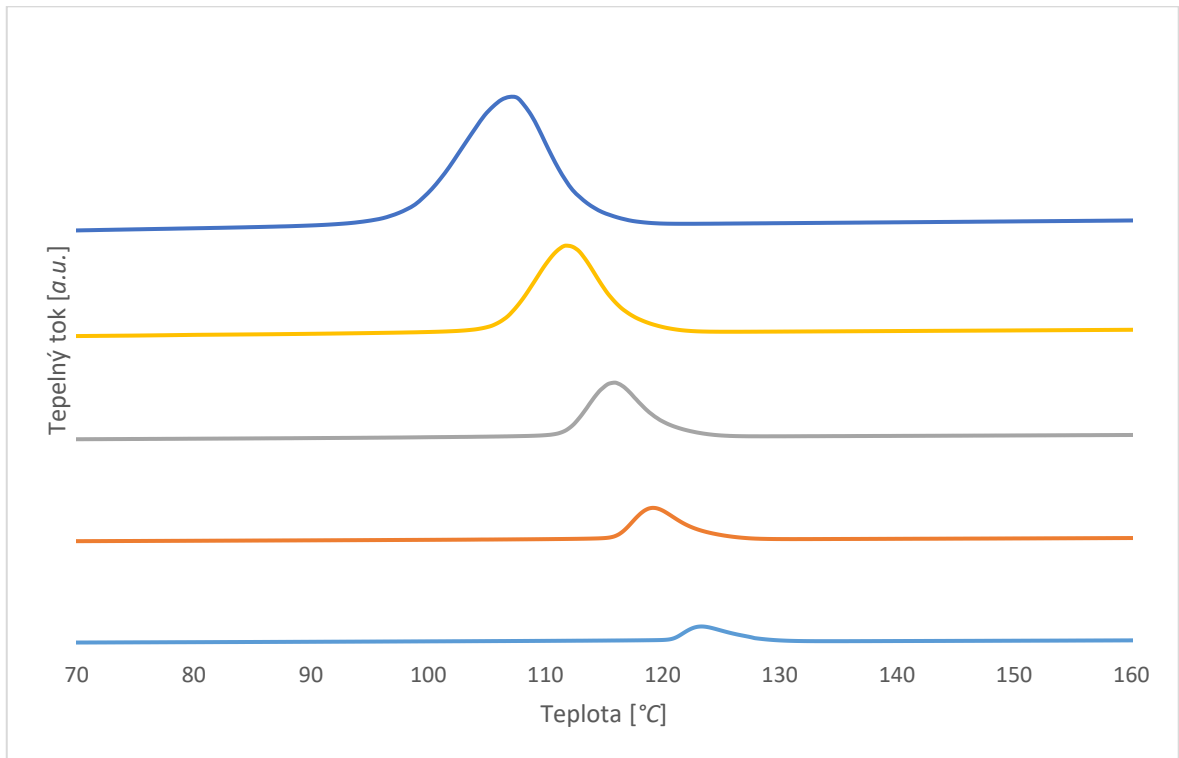
### 4.1 Neizotermní krystalizace

Na Obrázcích 7–14 jsou vyobrazeny krystalizační exotermny jednotlivých vzorků chlazených různými rychlostmi (2, 5, 10, 20, 40 °C/min). Krystalizační píky vykazují pouze jeden vrchol a jsou povětšinou symetrické. Z obrázků je zřejmé, že se zvyšující se rychlostí chlazení vzorků dochází k posunu píků směrem k nižším teplotám, a to u všech vzorků. Tento jev je běžně pozorován. Postupná krystalizace taveniny při chlazení nastává po překonání nukleační bariéry. Při rychlejším chlazení je tedy potřeba vyšší podchlazení taveniny a krystalizace tak nastává při nižší teplotě. Veškerá data získaná z krystalizačních křivek jsou zanesena do Tabulky 2. Za teplotu krystalizace je považován vrchol exotermu.

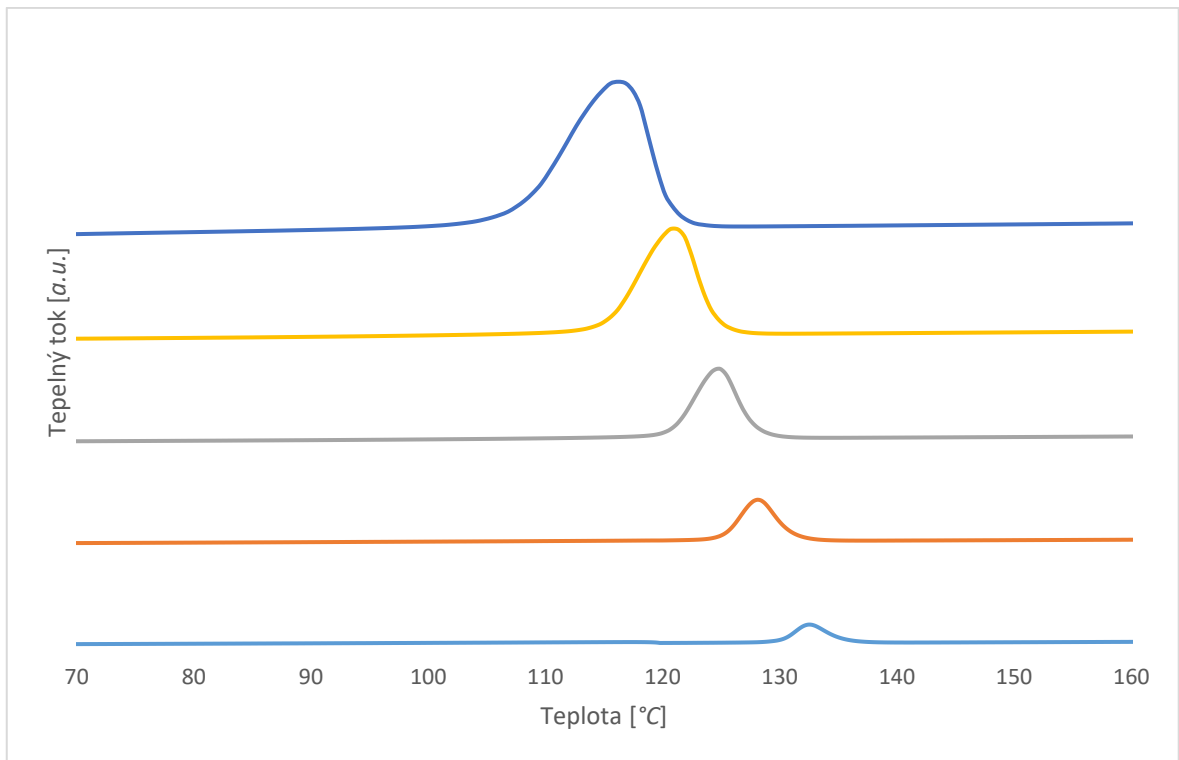
Exotermny vzorku L-PP ve srovnání s ostatními materiály jsou širší a mají plochý vrchol, což naznačuje širší distribuci velikostí krystalitů u lineárního polypropyleny. Integrací plochy pod křivkou se získá  $\Delta H_c$  neboli krystalizační teplo, jehož hodnota s postupným zvyšováním rychlosti chlazení klesá (viz Tabulka 2), tedy lze předpokládat, že klesá krystalinita vzorků. Skutečně, vyšší rychlost chlazení poskytuje pro krystalizaci méně času a vzniklé krystalické útvary pak jsou menší a méně dokonalé.

Z Tabulky 2 a zejména z Obrázku 15 je patrné, že přídavek LCB-PP do L-PP vede ke zvýšení krystalizační teploty, a to až o 10 °C a více, podle množství LCB-PP v L-PP. Nicméně stačí přídavek pouze 1 hm. % LCB-PP a dochází k výraznému zvýšení teploty krystalizace, u rychlosti chlazení 2 °C/min je to 123 °C vs. 132 °C. Zvyšování podílu větveného PP ve směsi se projeví dalším zvyšováním krystalizační teploty, avšak už jen v jednotkách °C. Nejvyšší teplotu krystalizace vykazuje čistý LCB-PP, a to cca 139 °C při rychlosti chlazení 2 °C/min. Stejný trend lze pozorovat u všech rychlostí chlazení, jen teploty jsou nižší. V literatuře se uvádí, že dlouhé větve plní funkci nukleačního činidla a zvyšují tak rychlost nukleace, čímž posouvají teplotu krystalizace k vyšším hodnotám. [11] Materiál tedy vykazuje tzv. samonukleaci. Přesná povaha samonukleace by mohla vyplývat ze samotné výroby větveného PP. V této práci použitý typ byl vyroben z lineárního PP působením peroxidů. Při tomto procesu dochází nejen k větvení, ale také štěpení řetězců a místnímu zesítní. Právě místa zesítní by pak mohla sloužit jako heterogenní nukleační zárodky a urychlovat tak celkovou krystalizaci. Rychlost nukleace se v tomto případě zdá být rozhodující pro

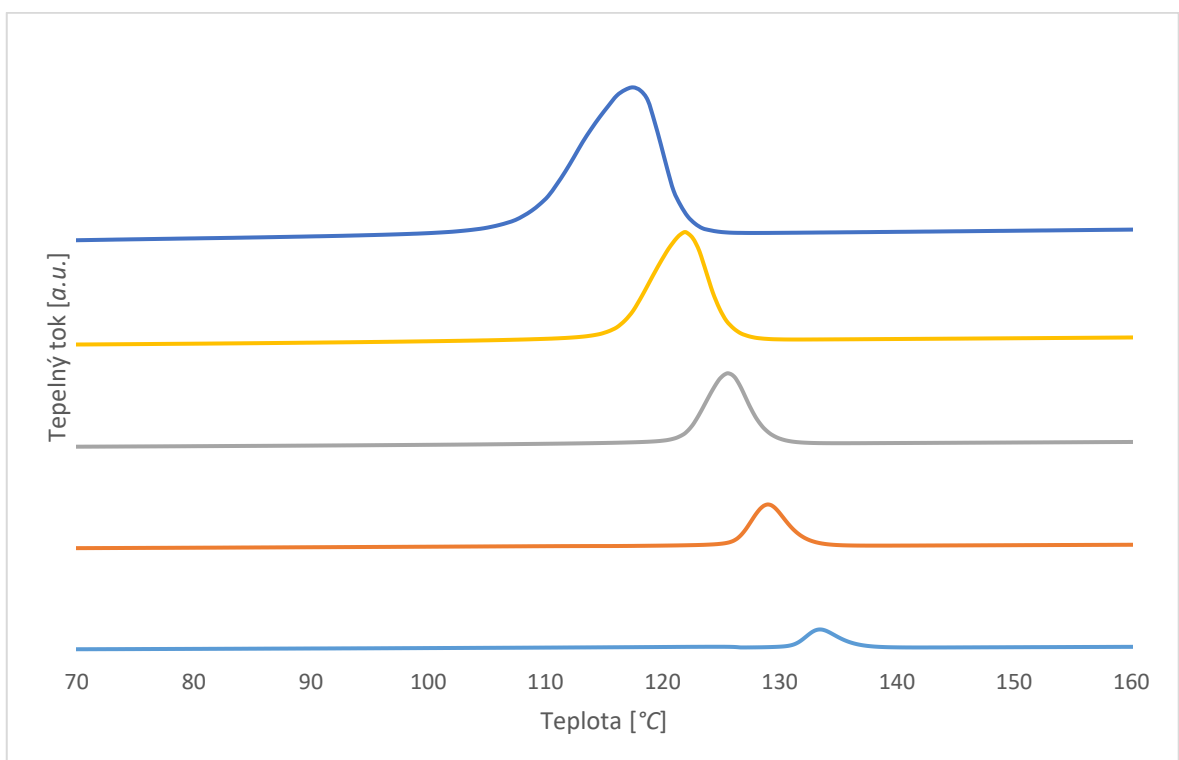
celkovou rychlost krystalizace. Rychlost růstu je totiž v případě LCB-PP naopak menší z důvodu přítomnosti nepravidelností v řetězci právě v místech větvení. [14]



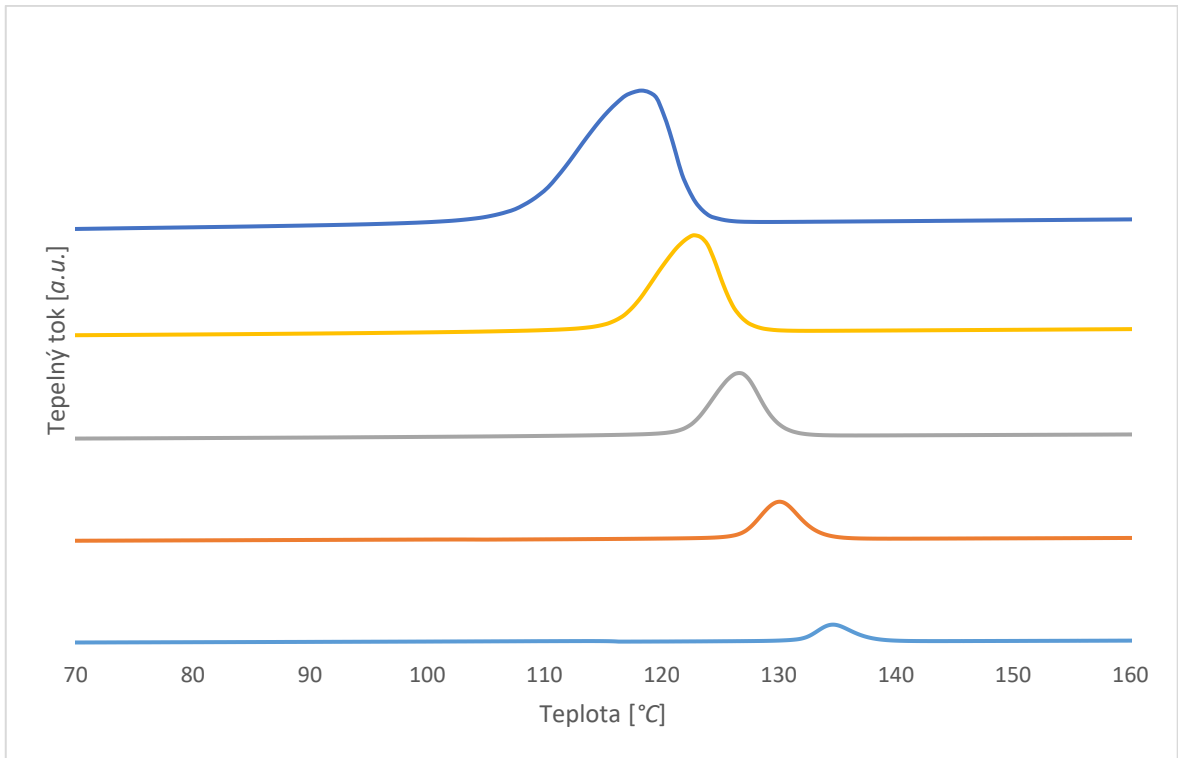
Obrázek 7 Krystalizační exotermie L-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



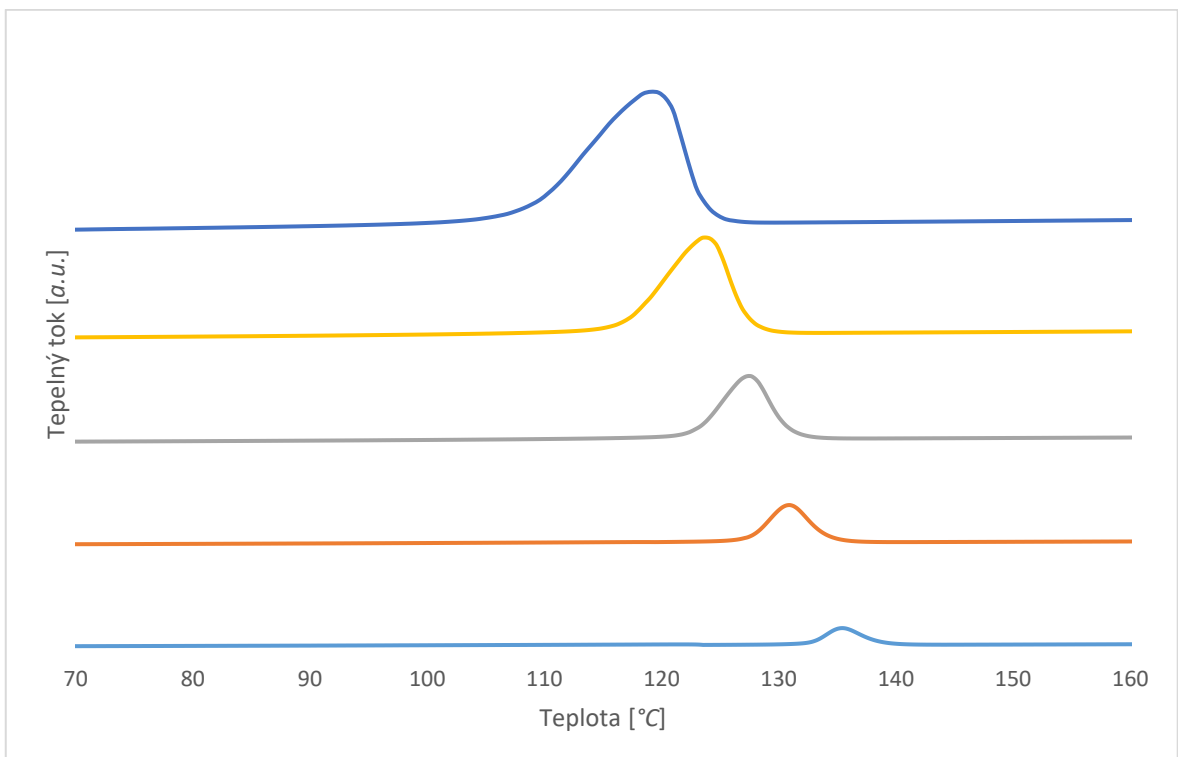
Obrázek 8 Krystalizační exotermie směsi 1 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



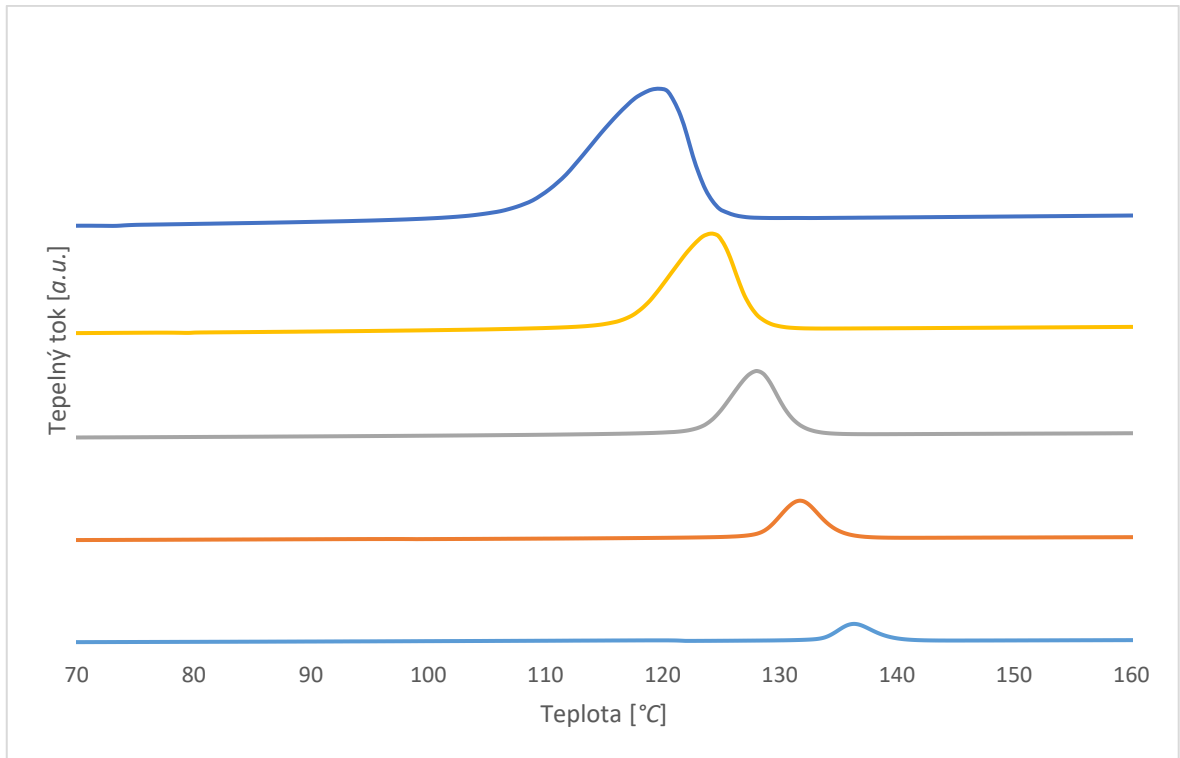
Obrázek 9 Krystalizační exotermie směsi 2 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



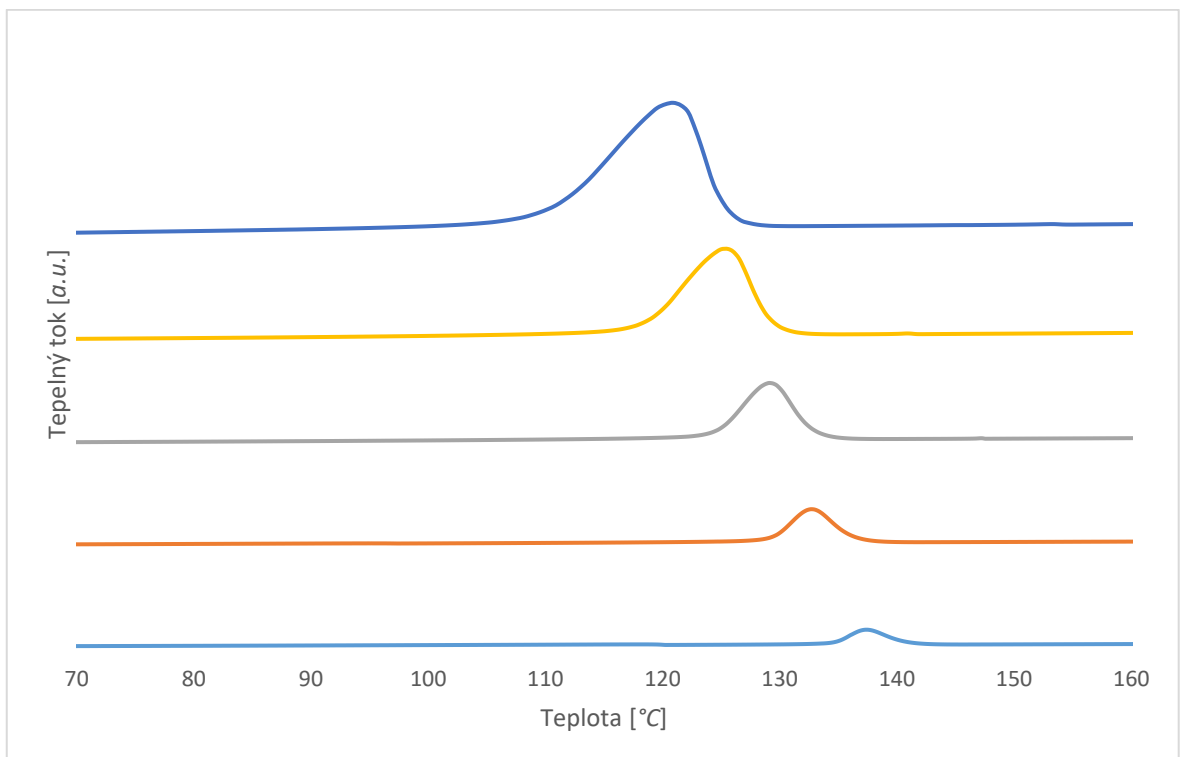
Obrázek 10 Krystalizační exotermie směsi 5 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



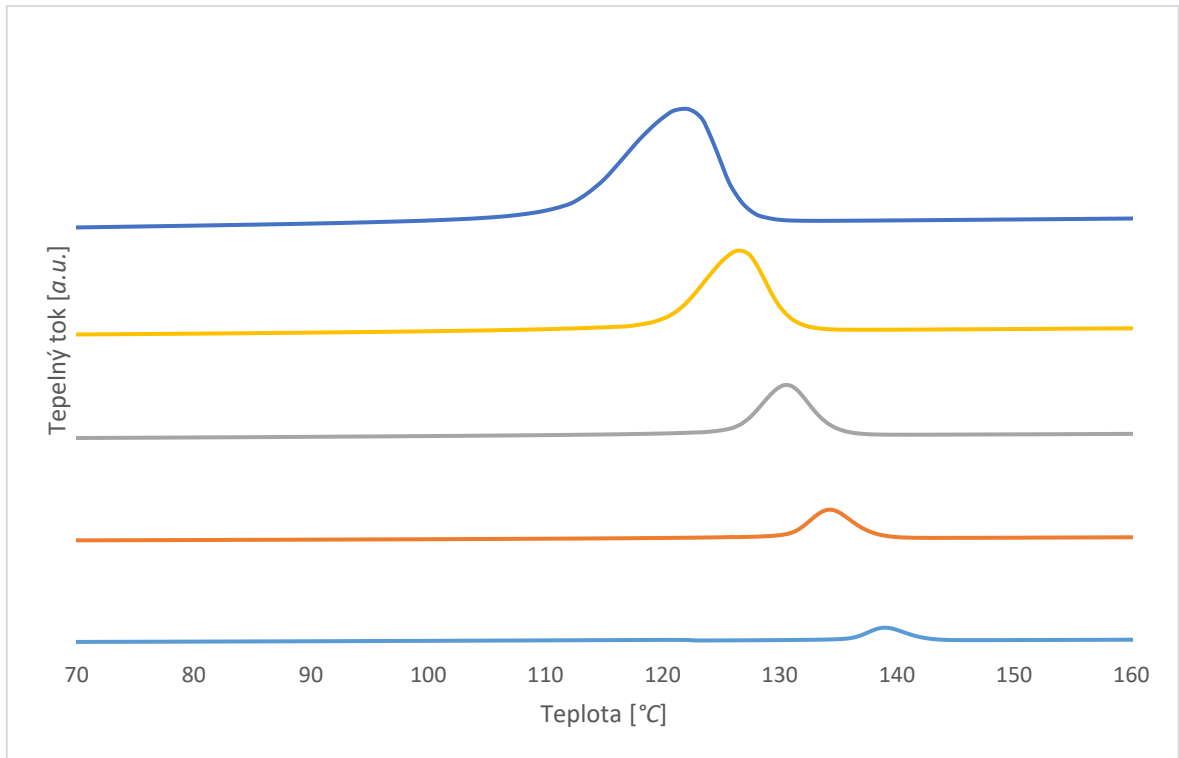
Obrázek 11 Krystalizační exotermie směsi 10 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



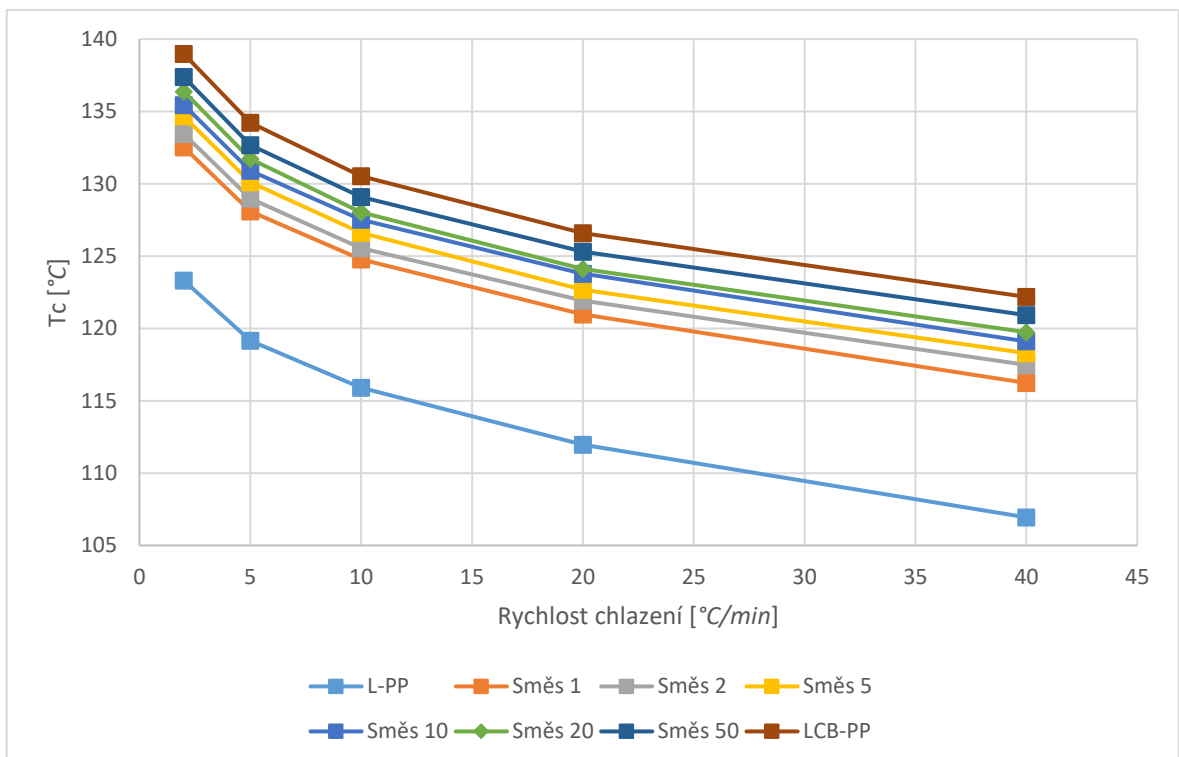
Obrázek 12 Krystalizační exotermie směsi 20 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



Obrázek 13 Krystalizační exotermie směsi 50 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



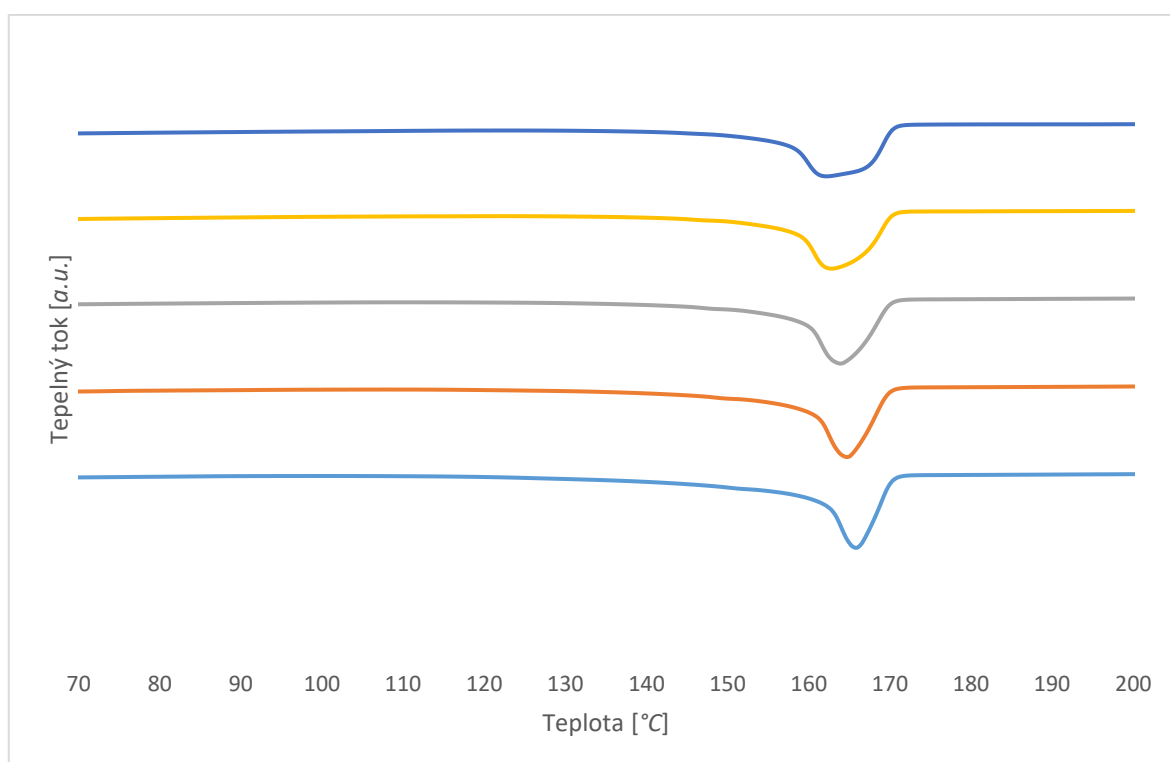
Obrázek 14 Krystalizační exotermie LCB-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



Obrázek 15 Závislost teploty krystalizace na rychlosti chlazení všech vzorků

## 4.2 Tání kontrolovaně krystalizovaných vzorků

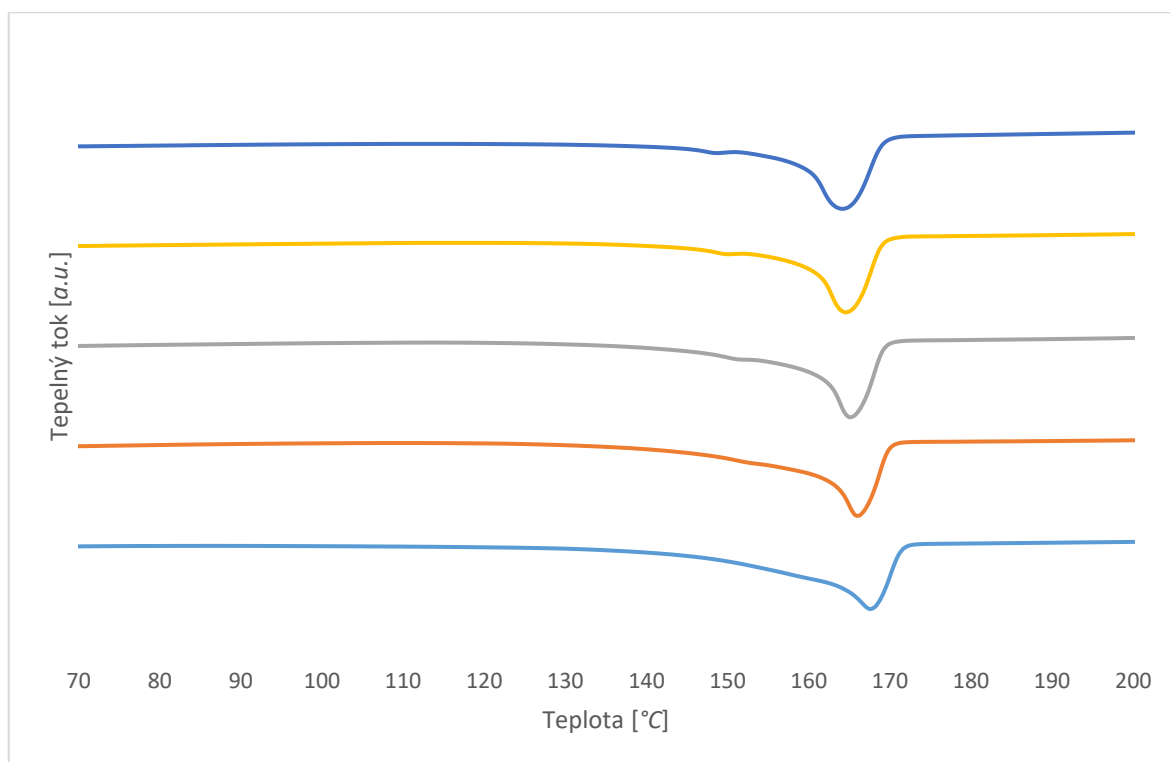
Na Obrázcích 16–23 jsou vyobrazeny endotermie tání jednotlivých vzorků po kontrolované neizotermní krystalizaci. Píky vykazují většinou jeden vrchol, jen v několika případech je možné pozorovat zdvojení píku či vytvoření ramene, zejména při vyšších rychlostech chlazení v čistém L-PP. V Tabulce 2 jsou shrnuta data získaná z endotermů tání. Za teplotu tání je považován vrchol píku. Integrací plochy pod píkem se získá  $\Delta H_m$  neboli teplo tání, a to dále slouží pro výpočet krystalinity (viz níže).



Obrázek 16 Termogramy tání L-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)

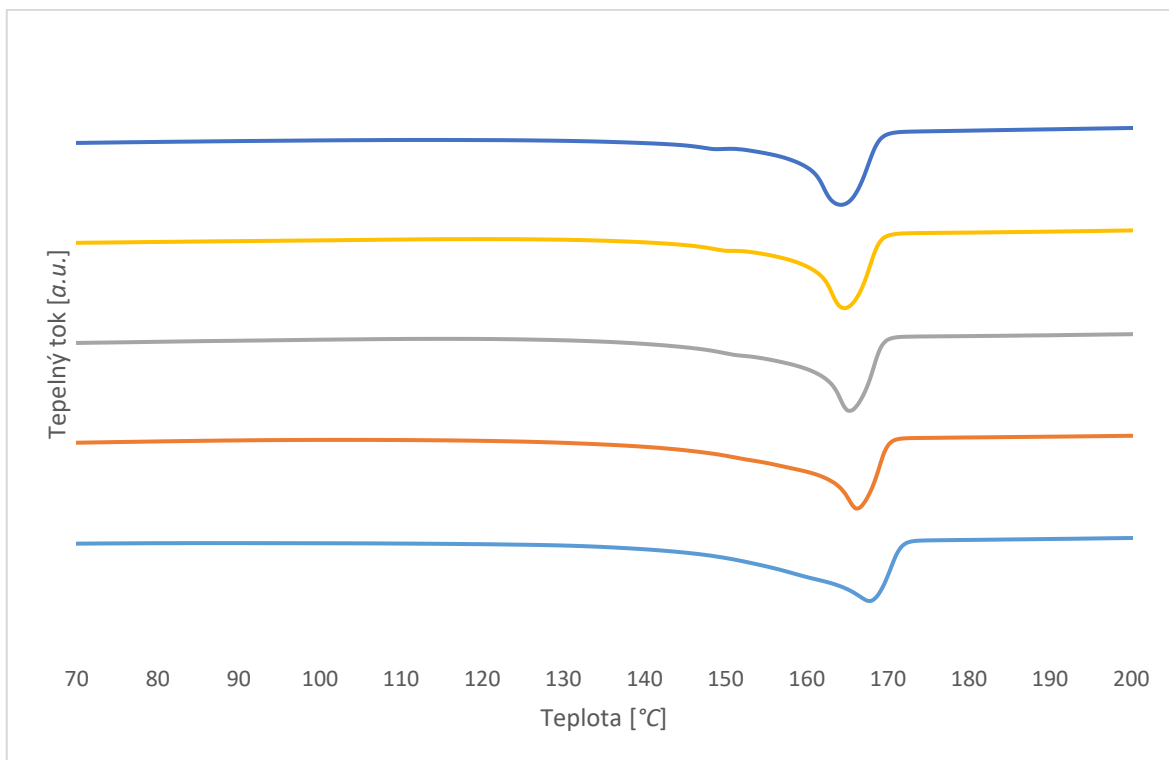
V případě termogramů tání L-PP (Obrázek 16) lze pozorovat u vzorku krystalizovaného při rychlosti chlazení 10 °C/min vytvoření ramene na endotermu tání a při vyšších rychlostech chlazení je toto rameno ještě výraznější. Toto je pravděpodobně spojeno s rekryalizačními procesy. Při krystalizaci probíhající za rychlého chlazení se vytvářejí krystality s mnoha defekty, které mají nižší teplotu tání. Při ohřevu pak dochází k jejich zdokonalování – rekrytalizaci a následnému tání při vyšší teplotě. Vznikají tedy ramena či dokonce zdvojené píky tání. Přítomnost jiného polymorfu než  $\alpha$  fáze však nelze ze záznamů tání určit.

Endotermie tání směsí (Obrázek 17–22) a endotermie tání LCB-PP (Obrázek 23) vykazují také jeden dominantní pík tání s jedním maximem. V některých případech lze pozorovat velmi malý pík kolem teploty 150 °C (např. Směs-1 40 °C/min, Obrázek 17). Tento malý pík naznačuje přítomnost trigonální  $\beta$  fáze. Zajímavá je také značná nesymetrie endotermů v případě směsí s vyšším podílem LCB-PP (Směs-20 a Směs-50) a čistého LCB-PP: při nižší teplotě, než je teplota vrcholu píku se tvoří široké rameno. Toto může být spojeno s vyšší tendencí LCB-PP krystalizovat do ortorombické  $\gamma$  fáze. Přesné polymorfní složení však není možné z DSC záznamů zjistit, bylo by zapotřebí provést měření širokoúhlou rentgenovou difrakcí (WAXD).

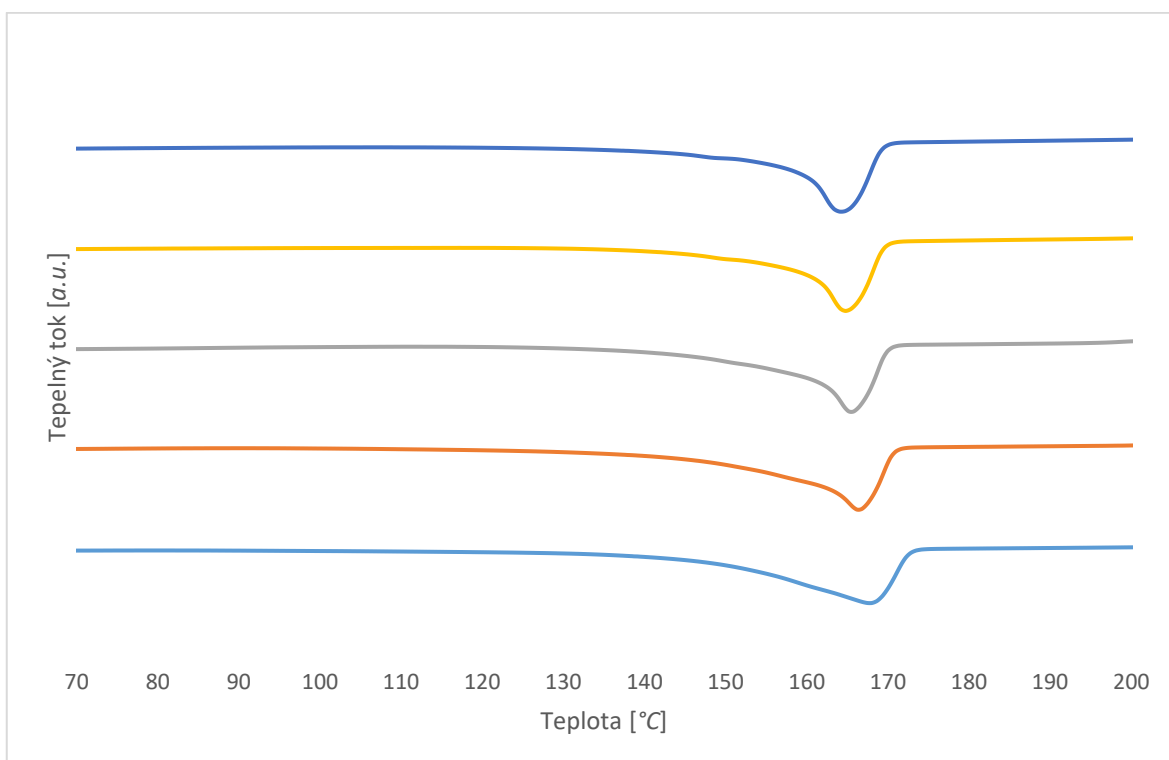


Obrázek 17 Termogramy tání Směs-1 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)

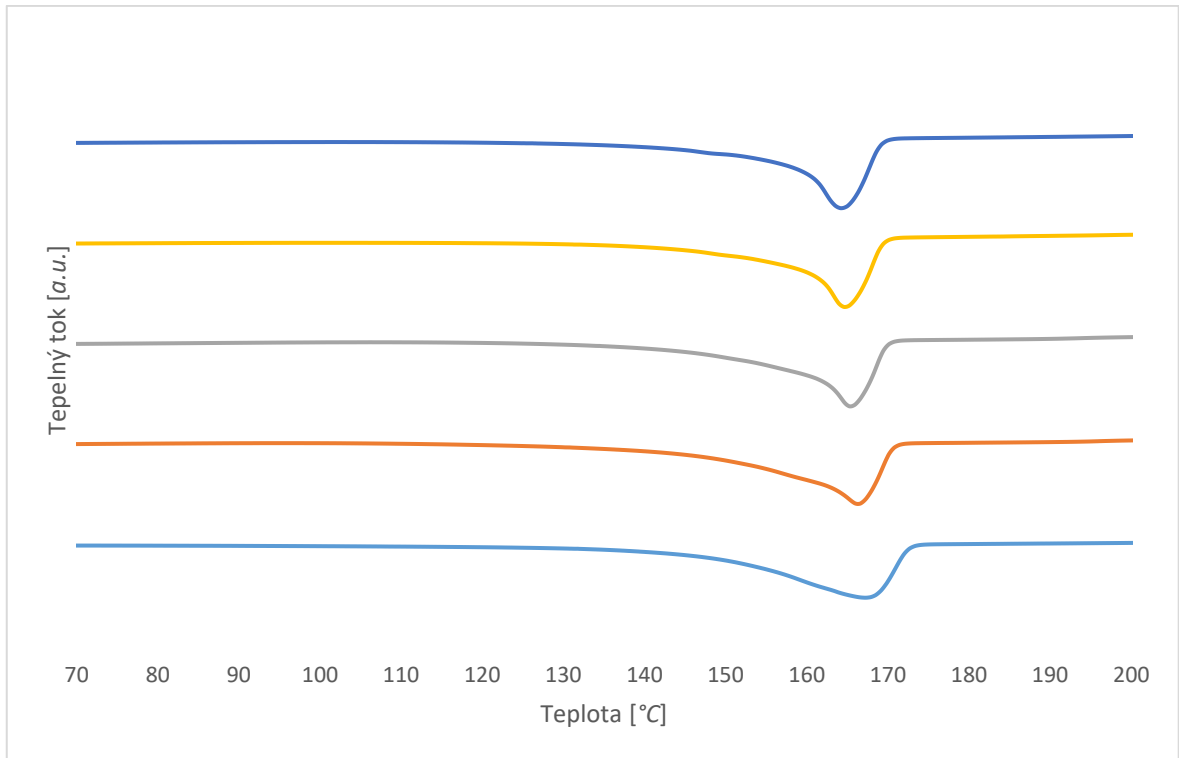




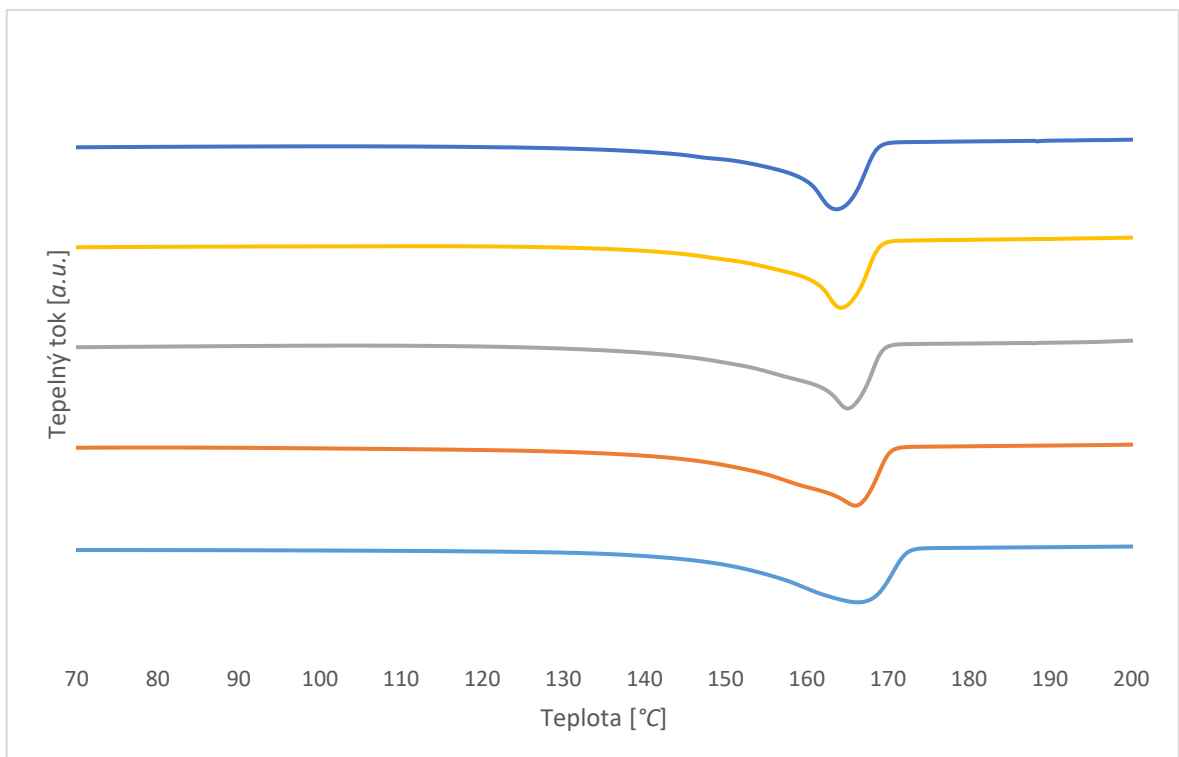
Obrázek 18 Termogramy tání Směs-2 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



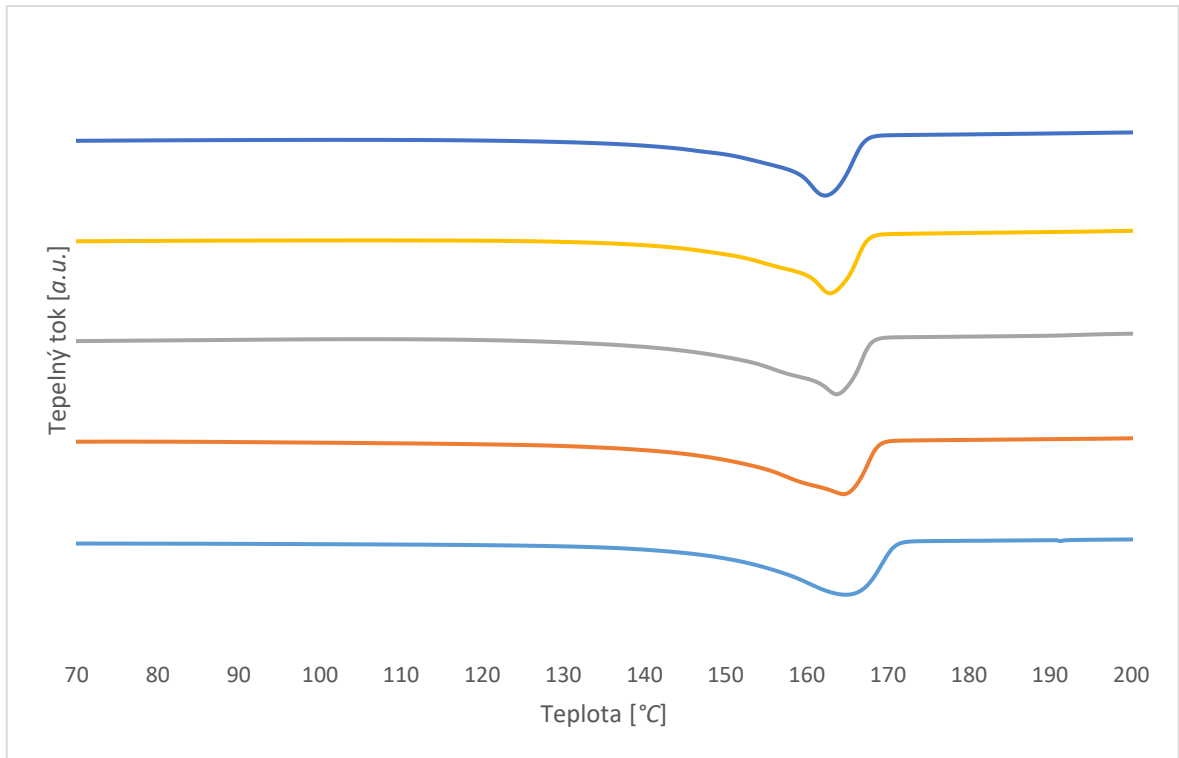
Obrázek 19 Termogramy tání Směs-5 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



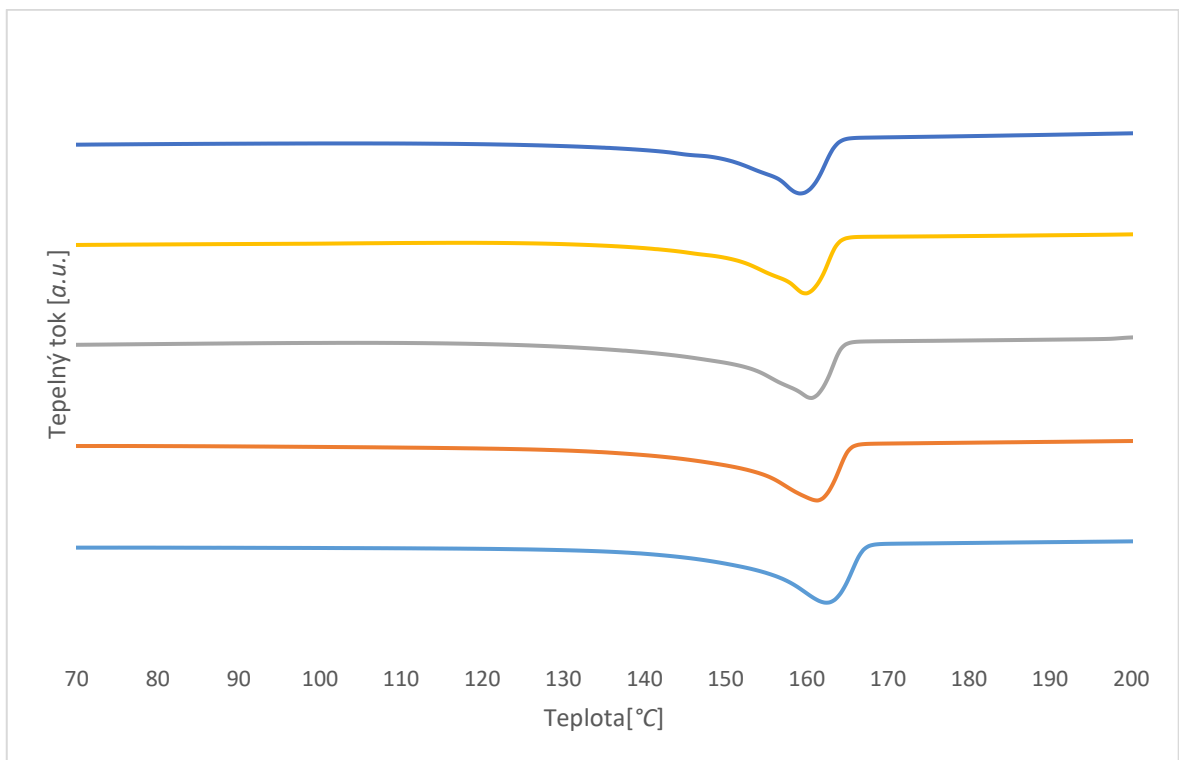
Obrázek 20 Termogramy tání Směs-10 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



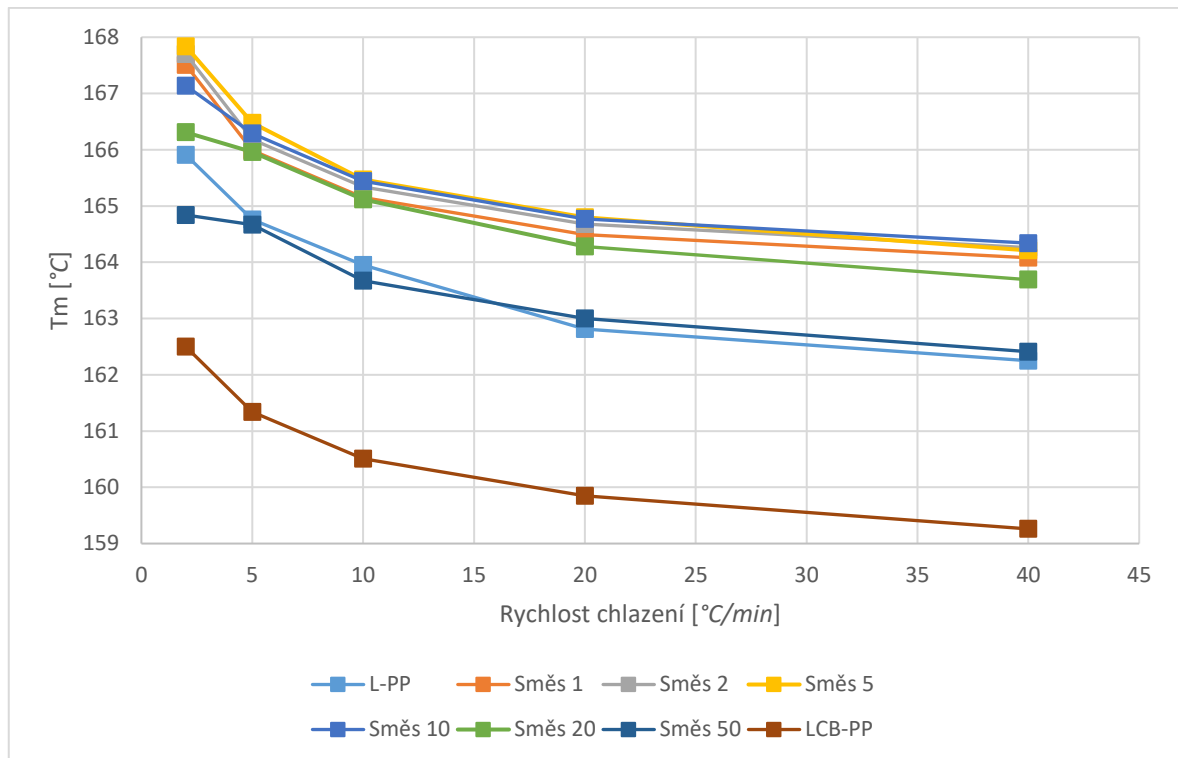
Obrázek 21 Termogramy tání Směs-20 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



Obrázek 22 Termogramy tání Směs-50 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



Obrázek 23 Termogramy tání LCB-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min)



Obrázek 24 Závislost teploty tání na rychlosti chlazení vzorků

Obrázek 24 ukazuje závislost teploty tání (dominantní pík) jednotlivých vzorků na rychlosti chlazení při krystalizaci. Je zřejmé, že teplota tání klesá s rostoucí rychlostí chlazení, a to ve všech případech. Tento trend se dal očekávat – při pomalejší krystalizaci je možnost tvorby dokonalejších krystalů s větší tloušťkou lamel, a tedy s vyšší teplotou tání. Teplota tání LCB-PP je ve srovnání s L-PP i všemi typy směsí nižší v případě všech rychlostí chlazení. Rozdíl činí přibližně 3 °C. Nižší teplota tání LCB-PP naznačuje vznik méně dokonalých krystalitů s menší tloušťkou lamel, což odpovídá i výsledkům z krystalizace. Zajímavé ovšem je, že s výjimkou Směsi-50, která vykazuje téměř shodné hodnoty, jsou teploty tání směsí vyšší než u L-PP, cca o 2 °C. Vyzorovat lze také to, že teplota tání ještě velmi mírně roste s rostoucím podílem LCB-PP ve směsi až do hodnoty 5 hm. %, poté následuje pokles. Směs-50 pak vykazuje podobné hodnoty teploty tání jako L-PP. Z výsledků tedy vyplývá, že obsah LCB-PP v čistém L-PP ovlivňuje teplotu tání. Do jistého obsahu LCB-PP se  $T_m$  zvyšuje, ale je-li obsah LCB-PP v čistém L-PP příliš velký, teplota tání vzorku zase začíná klesat.

Tabulka 2 Souhrn teplot krystalizace, teplot tání, krystalizačního tepla a tepla tání vzorků

	Rychlost chlazení [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]	$\Delta H_c$ [ $\text{J}/\text{g}$ ]	$T_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\Delta H_m$ [ $\text{J}/\text{g}$ ]	$T_m$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
L-PP	2	118	123,32	-108	165,91
	5	100	119,16	-98	164,76
	10	98	115,90	-92	163,95
	20	96	111,97	-85	162,81
	40	94	106,94	-85	162,25
Směs 1	2	98	132,53	-112	167,51
	5	96	128,10	-102	165,99
	10	96	124,77	-98	165,15
	20	95	120,98	-89	164,49
	40	94	116,23	-87	164,08
Směs 2	2	95	133,45	-111	167,70
	5	97	128,99	-105	166,18
	10	96	125,56	-98	165,34
	20	94	121,93	-96	164,68
	40	91	117,48	-97	164,26
Směs 5	2	99	134,66	-114	167,84
	5	97	130,11	-110	166,48
	10	96	126,62	-98	165,47
	20	94	122,68	-96	164,80
	40	92	118,29	-94	164,21
Směs 10	2	96	135,45	-112	167,14
	5	97	130,90	-114	166,29
	10	96	127,52	-105	165,44
	20	94	123,79	-98	164,77
	40	93	119,10	-94	164,34
Směs 20	2	98	136,38	-116	166,31
	5	98	131,73	-114	165,96
	10	97	128,02	-109	165,12
	20	96	124,11	-102	164,28
	40	94	119,74	-100	163,69
Směs 50	2	95	137,39	-114	164,84
	5	95	132,67	-111	164,67
	10	94	129,09	-102	163,67
	20	92	125,30	-96	163,00
	40	89	120,92	-95	162,41
LCB-PP	2	81	138,98	-100	162,50
	5	88	134,22	-99	161,34
	10	84	130,54	-94	160,51
	20	81	126,59	-89	159,85
	40	81	122,18	-90	159,26

### 4.3 Krystalinita

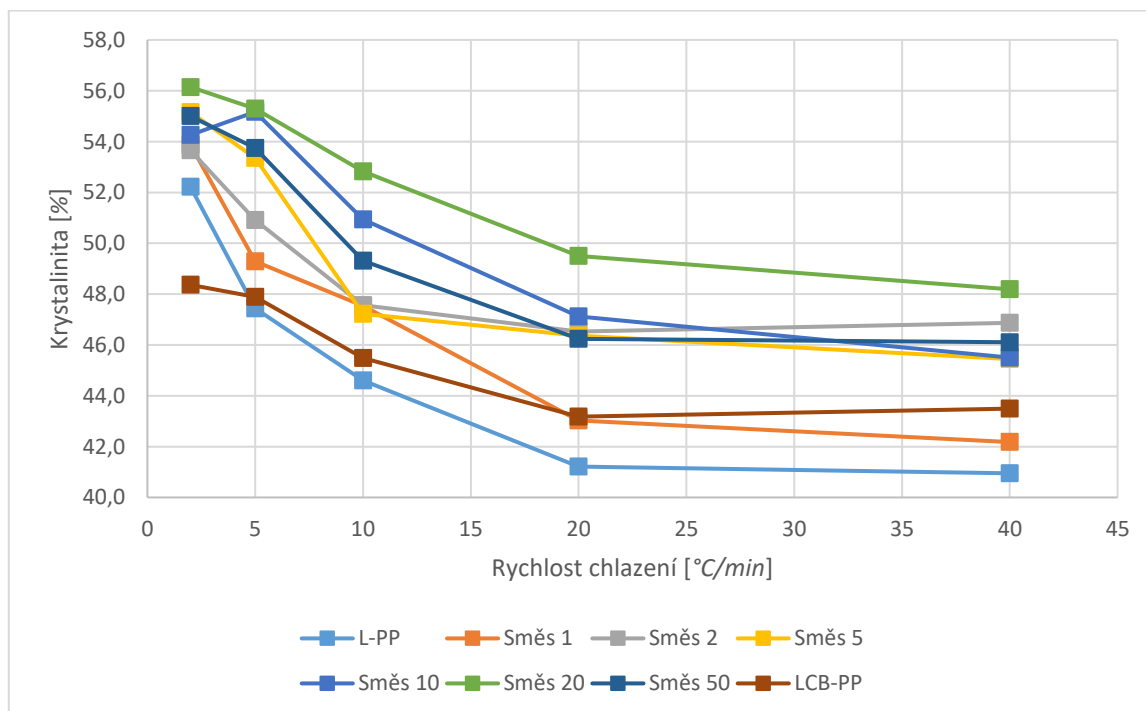
Krystalinitou je myšlen podíl krystalické fáze ve vzorku, tedy přítomnost třídimenzionálního systému na atomární úrovni. Krystalinita může být určena metodami difrakčními či měřením tepla tání. [24] Z DSC záznamu tání lze krystalinitu vypočítat podle rovnice:

$$X = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde  $\Delta H_m$  je teplo tání jednotlivých vzorků a  $\Delta H_m^0$  je teplo tání hypoteticky 100% krystalického polypropylenu ( $\Delta H_m^0 = 207 \text{ J/g}$ ). [25] Hodnoty krystalinit jednotlivých vzorků jsou zobrazeny v Tabulce 3 a graficky vyjádřeny na Obrázku 25.

Krystalinita obecně klesá s rychlostí chlazení vzorků, což je ve shodě s poklesem teploty tání. Při rychlejším chlazení má materiál méně času na tvorbu krystalické fáze.

Hodnoty krystalinity L-PP a LCB-PP jsou velmi podobné, avšak krystalinita směsí je téměř ve všech případech vyšší. Čím vyšší podíl LCB-PP ve směsi až do hodnoty 20 hm. %, tím vyšší krystalinita. V případě Směsi-50 krystalinita opět klesá. Stejně tak docházelo i k růstu teploty tání u směsí a s vyšším podílem LCB-PP ve směsi hodnota teploty tání klesala. (Obrázek 24).



Obrázek 25 Graf závislosti krystalinity jednotlivých vzorků na rychlosti chlazení vzorků

Tabulka 3 Hodnoty krystalinity jednotlivých vzorků

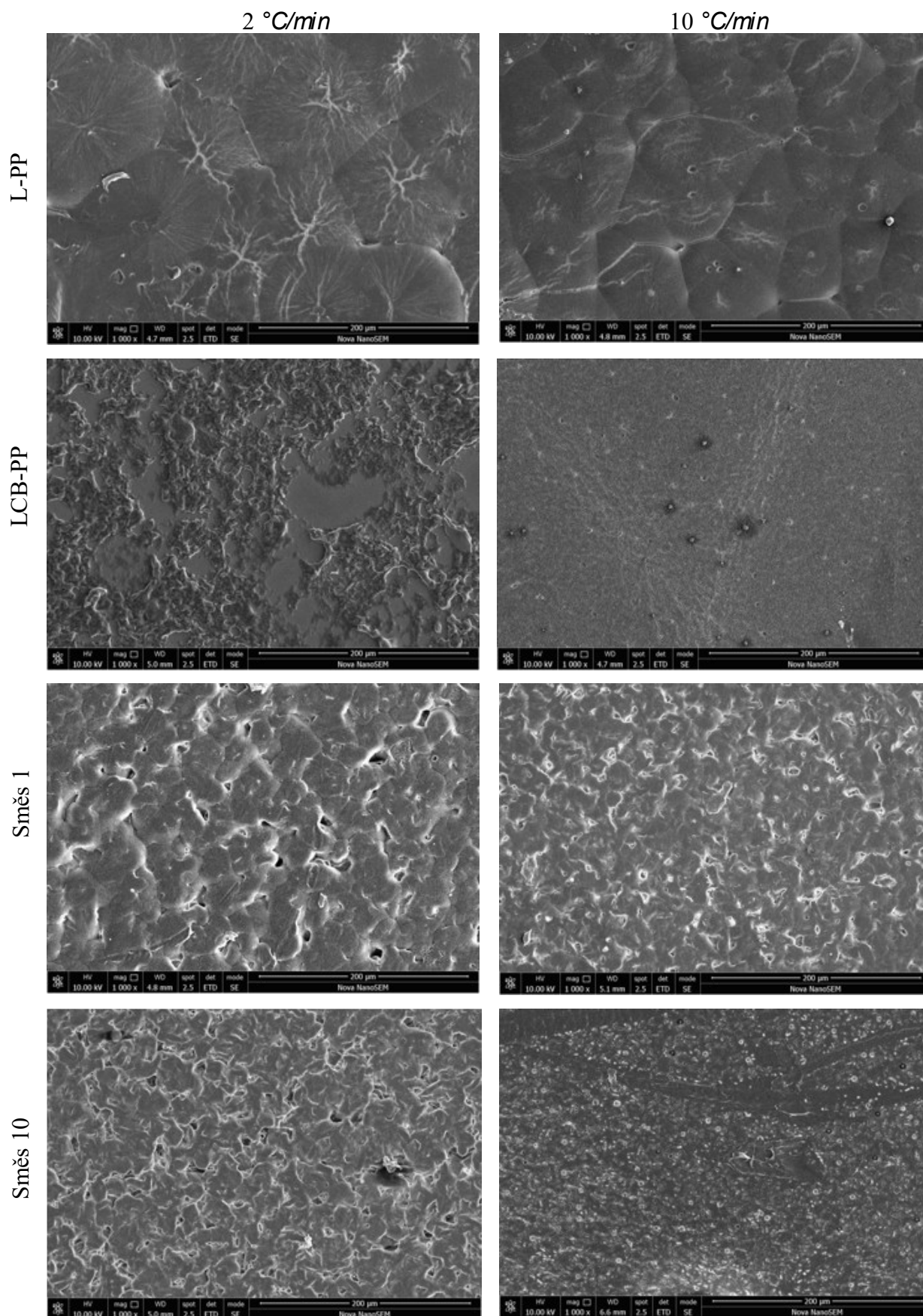
Vzorek	Rychlost chlazení [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]	Krystalinita [%]
L-PP	2	52,2
	5	47,4
	10	44,6
	20	41,2
	40	41,0
Směs 1	2	53,9
	5	49,3
	10	47,5
	20	43,0
	40	42,2
Směs 2	2	53,7
	5	50,9
	10	47,6
	20	46,5
	40	46,9
Směs 5	2	55,2
	5	53,4
	10	47,2
	20	46,4
	40	45,4
Směs 10	2	54,3
	5	55,2
	10	50,9
	20	47,1
	40	45,5
Směs 20	2	56,1
	5	55,3
	10	52,8
	20	49,5
	40	48,2
Směs 50	2	55,0
	5	53,7
	10	49,3
	20	46,2
	40	46,1
LCB-PP	2	48,4
	5	47,9
	10	45,5
	20	43,2
	40	43,5

#### 4.4 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

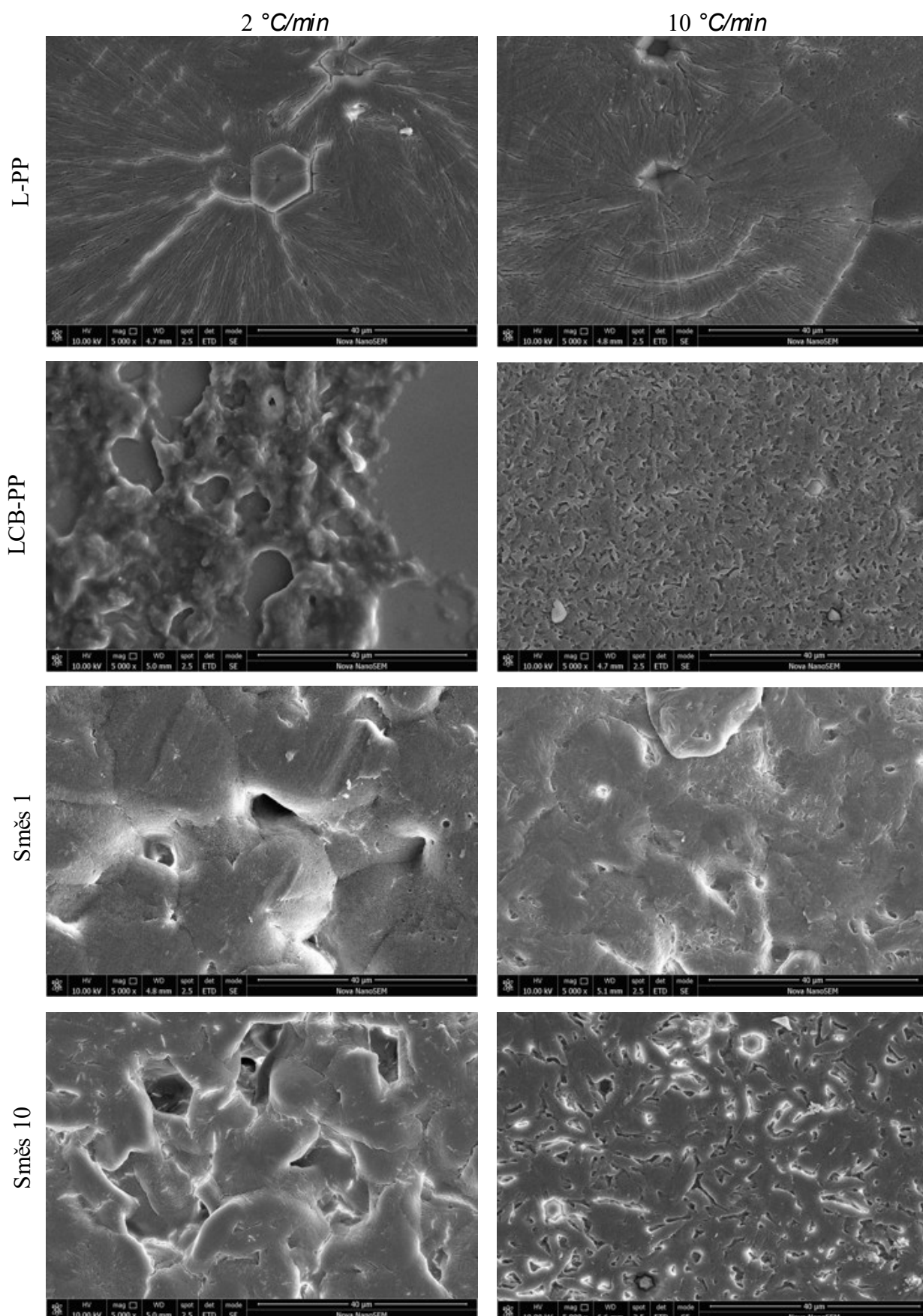
Na snímcích (Obrázek 26–28) ze skenovací elektronové mikroskopie (SEM) lze pozorovat morfologickou strukturu vybraných vzorků. Ze snímků je zřetelné, že rychlost chlazení má vliv na velikost krystalických útvarů, což je nejlépe pozorovatelné u vzorku L-PP chlazeného rychlostí 2 °C/min a 10 °C/min.

Dále je zřejmé, že přídavek LCB-PP ovlivňuje velikost krystalických útvarů – dochází k jejich značnému zmenšení, na snímcích pak nejsou jednotlivě rozlišitelné. V případě čistého LCB-PP chlazeného rychlostí 2 °C/min se nepodařilo připravit vhodný vzorek pro SEM analýzu. Materiál se při leptání rozpadal a film si nezachoval celistvost. Proto snímky tohoto vzorku jsou pořízeny pouze ze zbytků na sklíčku a není možné z nich vyvozovat závěry. Pro studium morfologie LCB-PP by tedy bylo vhodnější připravovat vzorky jiným způsobem.

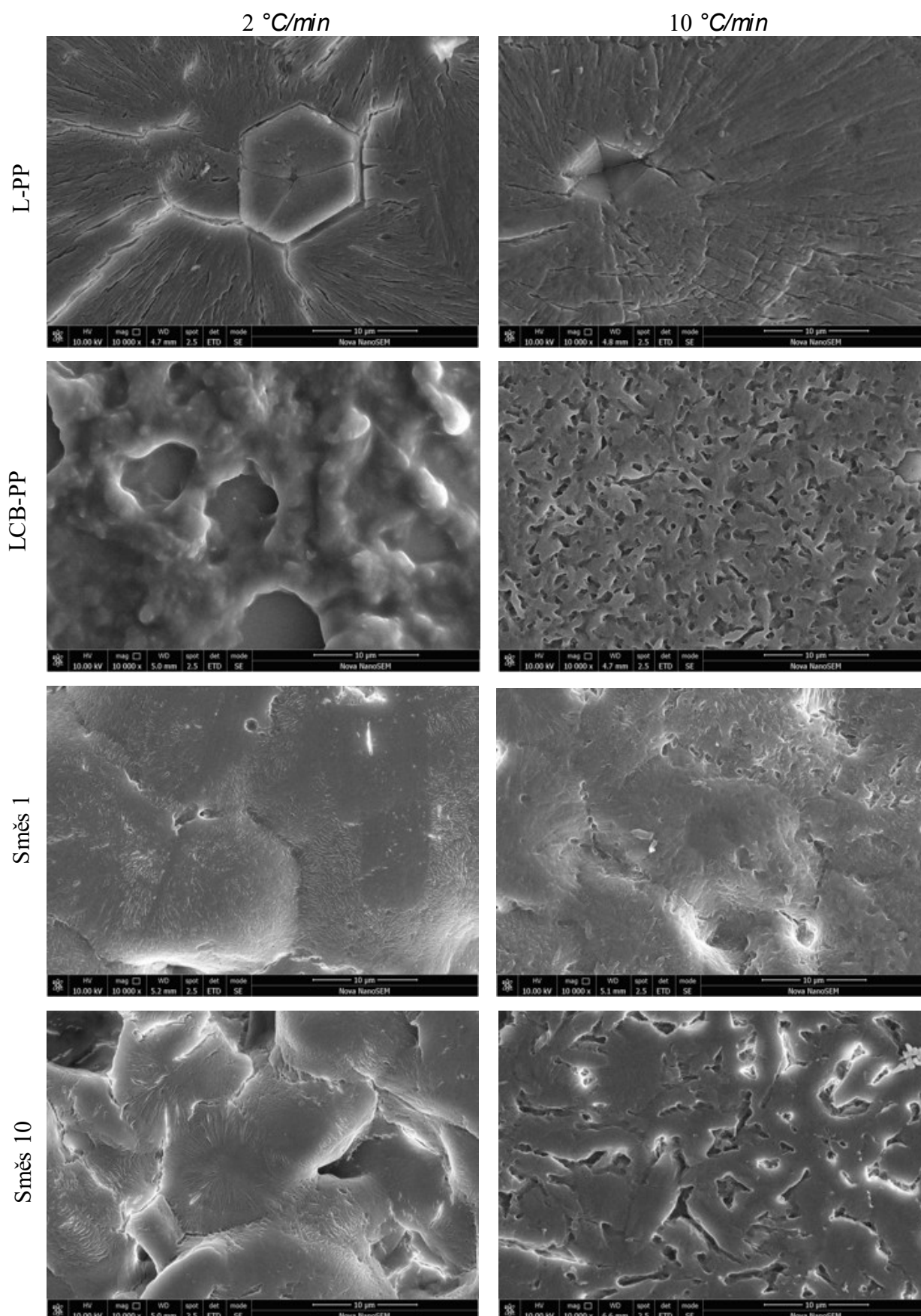




Obrázek 26 Snímky SEM vzorků při zvětšení 1000x



Obrázek 27 Snímky SEM vzorků při zvětšení 5000x



Obrázek 28 Snímky SEM vzorků při zvětšení 10 000x

## ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo studium neizotermní krystalizace směsí lineárního a větveného polypropylenu doplněné o studium čistého lineárního a větveného polypropylenu. Všechny směsi byly připraveny bez použití nukleačních činidel.

Vzorky byly podrobeny analýze metodou DSC. Metodou byla provedena neizotermní krystalizace vzorků za různých rychlostí chlazení (2, 5, 10, 20, 40 °C/min). Dále bylo metodou zkoumáno tání kontrolovaně krystalizovaných vzorků. Tím byly získány hodnoty teplot tání, které byly použity při výpočtu krystalinity daných vzorků.

Z výsledků neizotermní krystalizace bylo vyvozeno několik závěrů. Při zvyšující se rychlosti chlazení docházelo k postupnému posunu píků k nižším teplotám, což ukazuje, že krystalizace započala při nižší teplotě. Dále při zvyšující se rychlosti chlazení vzorků klesá krystalizační teplo  $\Delta H_c$ .

U směsí s různými poměry L-PP a LCB-PP bylo pozorováno zvýšení teploty krystalizace oproti čistému L-PP. Např. u Směsi-1, tedy u vzorku L-PP s 1 hm.% LCB-PP, dochází k výraznému zvýšení teploty krystalizace, u rychlosti chlazení 2 °C/min je to 123 °C vs. 132 °C. Čím vyšší podíl LCB-PP byl ve směsi, tím vyšší byla teplota krystalizace. Nejvyšší hodnoty byly pozorovány u čistého LCB-PP. Tento posun krystalizační teploty je přisuzován samonukleačnímu efektu LCB-PP, který zrychluje celkovou krystalizaci. [11]

U tání kontrolovaně krystalizovaných vzorků byl pozorován pokles teploty tání při zvyšující se rychlosti chlazení vzorků. Dále bylo zjištěno, že teplota tání LCB-PP je ve srovnání s L-PP i všemi typy směsí nižší u všech rychlostí chlazení. Teploty tání jednotlivých směsí postupně rostou a dosahují vyšších hodnot než čisté polypropyleny. Směsi s 1, 2, 5 hm % LCB-PP vykazují zvýšenou hodnotu teploty tání v porovnání s čistým L-PP. U směsí s vyšším obsahem LCB-PP (10, 20 hm% LCB-PP) opět dochází k mírnému poklesu teplot tání. A poslední Směs-50 má de facto stejné hodnoty teplot tání, jako vzorek čistého L-PP. Můžeme tedy říct, že do jistého obsahu LCB-PP se  $T_m$  zvyšuje, ale je-li obsah větveného polypropylenu v čistém lineárním polypropyleny příliš velký, teplota tání vzorku opět začíná klesat.

Výsledky dále potvrdily, že krystalinita klesá s rostoucí rychlostí chlazení vzorků. Hodnoty krystalinity L-PP a LCB-PP jsou velmi podobné. Se zvyšujícím se podílem LCB-PP ve směsi s L-PP, se zvyšuje krystalinita. A to až po hodnotu 20 hm. % LCB-PP v čistém L-PP.

U vzorku Směs-50, tedy 50 *hm.%* LCB-PP a 50 *hm.%* L-PP se krystalinita opět snižuje. Nicméně krystalinita všech směsí je větší než u čistých polypropylenů.

Analýza vzorků pomocí skenovací elektronové mikroskopie nám na snímcích dokazuje, že rychlost chlazení vzorků má vliv na velikost krystalitů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2022-05-12]. ISBN 80-708-0617-6. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html)
- [2] NAVRÁTILOVÁ, Jana. *Přednáška z předmětu Makromolekulární chemie II: Polyolefiny-PP, PB, PMP, COC* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2020. [cit. 2022-05-12].
- [3] G. KARIAN, Haratun, ed. *Handbook of polypropylene and polypropylene composites* [online]. 2. edition. New York: Marcel Dekker, 2003 [cit. 2020-11-17]. ISBN 0-8247-4064-5. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com.proxy.k.utb.cz/books/9780429213823>
- [4] Polypropylene. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>
- [5] MLEZIVA, J. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [6] MAIER, C., T. CALAFUT. *Polypropylene: The definitive user's guide and databook* [online]. Norwich: Plastics Design Library, 1998 [cit. 2022-05-12]. ISBN 18-842-0758-8. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/polypropylene-the-definitive-users-guide-and-databook-e186631670.html>
- [7] HOLUBÁŘ, R. *Závislost struktury polypropylenu na extrémní rychlosti chlazení* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/33373>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [8] NOZAKI, K., Y. ENDO, T. YAMAMOTO a M. NAIKI. Crystallization of  $\alpha$  and  $\gamma$  Phases in Isotactic Polypropylene with Low Ethylene Content: Isothermal Crystallization and Secondary Crystallization. *Journal of Macromolecular Science, Part B* [online].

2007, **42**(3-4), 697-707 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0022-2348. Dostupné z: doi:10.1081/MB-120021600

[9] NAKAMURA, K., S. SHIMIZU, S. UMEMOTO, A. THIERRY, B. LOTZ a N. OKUI. Temperature Dependence of Crystal Growth Rate for  $\alpha$  and  $\beta$  Forms of Isotactic Polypropylene. *Polymer Journal* [online]. 2008, **40**(9), 915-922 [cit. 2022-04-24]. ISSN 0032-3896. Dostupné z: doi:10.1295/polymj.PJ2007231

[10] VILČ, L. *Vliv teploty a času na podíl krystalické a amorfni fáze v polypropylenu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6278>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů.

[11] GAJZLEROVA, L., J. NAVRATILOVA, A. RYZI, T. SLABENAKOVA a R. CERMAK. Joint effects of long-chain branching and specific nucleation on morphology and thermal properties of polypropylene blends. *Express Polymer Letters* [online]. 2020, **14**(10), 952-961 [cit. 2022-05-12]. ISSN 1788618X. Dostupné z: doi:10.3144/expresspolymlett.2020.77

[12] ZHOU, S., W. WANG, Z. XIN, S. ZHAO a Y. SHI. Relationship between molecular structure, crystallization behavior, and mechanical properties of long chain branching polypropylene. *Journal of Materials Science* [online]. 2016, **51**(12), 5598-5608 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-016-9856-0

[13] FIALOVÁ, V. *Polypropylen s dlouhými větvemi* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/34014>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[14] NAVRATILOVA, J., L. GAJZLEROVA, L. KOVAR a R. CERMAK. Long-chain branched polypropylene: Crystallization under high pressure and polymorphic composition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2021, **143**(5), 3377-3383 [cit. 2022-05-12]. ISSN 1388-6150. Dostupné z: doi:10.1007/s10973-020-09931-1

[15] Polypropylen, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>

[16] RAAB, M. *Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy*. 2. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2020. ISBN 978-80-7454-901-4.

[17] Polypropylene. In: *Polymer science learning center* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macrog/images/prop02.gif>

[18] MLEZIVA, J. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.

[19] LEDNICKÝ, F. *Mikroskopie a morfologie polymerů*. Díl 2. Morfologie polymerů. Liberec: TU v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-487-0.

[20] ZHAO, W., Y. HUANG, X. LIAO a Q. YANG. The molecular structure characteristics of long chain branched polypropylene and its effects on non-isothermal crystallization and mechanical properties. *Polymer* [online]. 2013, **54**(4), 1455-1462 [cit. 2022-05-12]. ISSN 00323861. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymer.2012.12.073

[21] TABATABAEI, Seyed H., Pierre J. CARREAU a A. AJJI. Rheological and thermal properties of blends of a long-chain branched polypropylene and different linear polypropylenes. *Chemical Engineering Science* [online]. 2009, **64**(22), 4719-4731 [cit. 2022-05-12]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2009.04.009

[22] MAROUFKHANI, M. a N. GOLSHAN EBRAHIMI. Melt rheology of linear and long-chain branched polypropylene blends. *Iranian Polymer Journal* [online]. 2015, **24**(9), 715-724 [cit. 2022-05-12]. ISSN 1026-1265. Dostupné z: doi:10.1007/s13726-015-0357-9

[23] SLABĚŇÁKOVÁ, T. *Směsi lineárního a rozvětveného polypropylenu* [online]. Zlín, 2020 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/49072>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.



[24] MCNAUGHT, A. D. a A. WILKINSON. IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology* [online]. 2. edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 2019 [cit. 2022-05-12]. ISBN 0-9678550-9-8. Dostupné z: doi:10.1351/goldbook

[25] BLAINE, R. L. THERMAL APPLICATIONS NOTE: Polymer Heats of Fusion. In: *TA Instruments* [online]. 109 Lukens Drive, New Castle DE 19720, USA, 2017 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TN048.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PP	polypropylen
L-PP	lineární polypropylen
LCB-PP	polypropylen s dlouhými větvemi
iPP	izotaktický polypropylen
sPP	syndiotaktický polypropylen
aPP	ataktický polypropylen
$T_c$	teplota krystalizace
$T_m$	teplota tání
$\Delta H_m$	teplo tání
$\Delta H_c$	teplo krystalizace
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
WAXD	širokoúhlá rentgenová difrakce
hm. %	hmotnostní procento

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Chemická struktura polypropylen [15] .....	12
Obrázek 2 Výroba polypropylen [17] .....	12
Obrázek 3 Stereoizomery PP [18] .....	13
Obrázek 4 Krystalická struktura polypropylen [19] .....	15
Obrázek 5 Maltézské kříže lineárního polypropylen .....	17
Obrázek 6 Výroba LCB-PP [13].....	19
Obrázek 7 Krystalizační exotermie L-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	26
Obrázek 8 Krystalizační exotermie směsi 1 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	27
Obrázek 9 Krystalizační exotermie směsi 2 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	27
Obrázek 10 Krystalizační exotermie směsi 5 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	28
Obrázek 11 Krystalizační exotermie směsi 10 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	28
Obrázek 12 Krystalizační exotermie směsi 20 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	29
Obrázek 13 Krystalizační exotermie směsi 50 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	29
Obrázek 14 Krystalizační exotermie LCB-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min) .....	30
Obrázek 15 Závislost teploty krystalizace na rychlosti chlazení všech vzorků.....	30
Obrázek 16 Termogramy tání L-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	31
Obrázek 17 Termogramy tání Směs-1 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	32
Obrázek 18 Termogramy tání Směs-2 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	33
Obrázek 19 Termogramy tání Směs-5 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	33
Obrázek 20 Termogramy tání Směs-10 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	34
Obrázek 21 Termogramy tání Směs-20 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	34
Obrázek 22 Termogramy tání Směs-50 při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	35

---

Obrázek 23 Termogramy tání LCB-PP při různých rychlostech chlazení (shora 40 °C/min, 20 °C/min, 10 °C/min, 5 °C/min, 2 °C/min).....	35
Obrázek 24 Závislost teploty tání na rychlosti chlazení vzorků.....	36
Obrázek 25 Graf závislosti krystalinity jednotlivých vzorků na rychlosti chlazení vzorků	38
Obrázek 26 Snímky SEM vzorků při zvětšení 1000x.....	41
Obrázek 27 Snímky SEM vzorků při zvětšení 5000x.....	42
Obrázek 28 Snímky SEM vzorků při zvětšení 10 000x.....	43

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Složení jednotlivých směsí .....	22
Tabulka 2 Souhrn teplot krystalizace, teplot tání, krystalizačního tepla a tepla tání vzorků .....	37
Tabulka 3 Hodnoty krystalinity jednotlivých vzorků .....	39

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Borclean HC310BF

Příloha P II: Materiálový list Daploy WB140HMS

## PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST BORCLEAN HC310BF

PRODUCT DATA SHEET

02.03.2017 Ed.1

**Description**

Borclean HC310BF - is a high crystallinity homopolymer film resin.

**Applications**

Borclean HC310BF is recommended for:

BOFP Dielectrical film for capacitors

Metallisable film

**Additives**

Borclean HC310BF does not contain slip or antiblock additives.

**Special Features**

Borclean HC310BF is optimised to deliver:

Super high purity  
Improved high thermal stability  
Low dissipation factor  
Good stiffness

Easy surface roughness control  
Outstanding processability  
Metallisable  
Very low ash content

**Physical Properties**

Property	Typical Value	Test Method
Melt Flow Rate (230 °C/2,16 kg)	3,3 g/10min	ISO 1133
Catalyst residues Titanium (ICP)	< 3 ppm	Borealis Method
Catalyst residues Aluminium (ICP)	< 3 ppm	Borealis Method
Catalyst residues Chloride (XRF)	< 3 ppm	Borealis Method
Total ash content	< 20 ppm	ISO 3451-1
Molecular weight distribution	Broad	

**Electrical Properties**

Property	Typical Value	Test Method
Dielectric constant	2,25	IEC 60250

Borclean is a trademark of the Borealis group. Borclean is a trademark of the Borealis group.

Borealis AG | Wagramer Strasse 17-19 | 1220 Vienna | Austria  
Telephone +43 1 224 00 0 | Fax +43 1 22 400 333  
FN 269858a | CCC Commercial Court of Vienna | Website [www.borealisgroup.com](http://www.borealisgroup.com)



PRODUCT DATA SHEET

02.03.2017 Ed.1

**Polypropylene**  
**Borclean HC310BF****Storage**

Borclean HC310BF has a minimum shelf life of 18 months from production date if stored in unopened original packages, under dry and clean conditions and protected from UV light.

Recommended storage time at customer should not exceed 6 months.

Improper storage can initiate degradation, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.

**Safety**

The product is not classified as dangerous.

Please see our "Safety data sheet" / "Product safety information sheet" for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the product. For more information, contact your Borealis representative.

**Recycling**

The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.

**Related Documents**

The following related documents are available on request, and represent various aspects on the usability, safety, recovery and disposal of the product.

"Safety data sheet" / "Product safety information sheet"  
Statement on compliance to food contact regulations  
Statement on chemicals, regulations and standards



PRODUCT DATA SHEET

02.03.2017 Ed.1

**Polypropylene****Borclean HC310BF****Disclaimer**

The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication; however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

Borealis makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.

No liability can be accepted in respect of the use of any Borealis product in conjunction with any other products and/or materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any other material unless as specifically provided for in the test methods stated above.

## PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST DAPLOY WB140HMS

PRODUCT DATA SHEET

17.09.2019 Ed.2


**Polypropylene**  
**Daploy™ WB140HMS**
**Description**

Daploy WB140HMS is a structurally isomeric modified propylene homopolymer.  
It is a long chain branched homopolymer

**Applications**

Daploy WB140HMS is recommended for:

Foamed application in automotive, food packaging or other foamed sheet converting technologies.

**Special Features**

Daploy WB140HMS is optimised to deliver:

High stiffness  
High service temperature  
Excellent processability

Foamability in foam extrusion processes  
Good insulation properties of foamed materials  
Good thermal and acoustic insulation properties

**Physical Properties**

Property	Typical Value	Test Method
	<small>Data should not be used for specification work</small>	
Melt Flow Rate (230 °C/2,16 kg)	2,1 g/10min	ISO 1133
Tensile Modulus	2.000 MPa	ISO 527-2

**Application Related Properties**

Property	Typical Value	Test Method
	<small>Data should not be used for specification work</small>	
Melt strength	36 c N	Borealis Method
Melt Extensibility	230 mm/sec	Borealis Method

**Storage**

Daploy WB140HMS should be stored in dry conditions at temperatures below 50°C and protected from UV-light. Improper storage can initiate degradation, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.

**Safety**

The product is not classified as dangerous.

Please see our "Safety data sheet" / "Product safety information sheet" for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the product. For more information, contact your Borealis representative.

Daploy is a trademark of the Borealis group.

Borealis AG | Wagramer Strasse 17-19 | 1220 Vienna | Austria  
Telephone +43 1 224 00 0 | Fax +43 1 22 400 333  
FN 269858a | CCC Commercial Court of Vienna | Website [www.borealisgroup.com](http://www.borealisgroup.com)



PRODUCT DATA SHEET

17.09.2019 Ed.2

**Polypropylene**  
**Daploy WB140HMS****Recycling**

The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.

**Related Documents**

The following related documents are available on request, and represent various aspects on the usability, safety, recovery and disposal of the product.

"Safety data sheet" / "Product safety information sheet"  
Statement on chemicals, regulations and standards  
General statement on compliance to food contact regulations  
Statement on Origin of Raw Materials

**Disclaimer**

The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication; however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

**Borealis makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.**

**It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.**

No liability can be accepted in respect of the use of any Borealis product in conjunction with any other products and/or materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any other material unless as specifically provided for in the test methods stated above.

Borealis AG | Wagramer Strasse 17-19 | 1220 Vienna | Austria  
Telephone +43 1 224 00 0 | Fax +43 1 22 400 333  
FN 269858a | CCC Commercial Court of Vienna | Website [www.borealisgroup.com](http://www.borealisgroup.com)