

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Tia RENKO

**VZPOSTAVITEV MFI NAPRAVE IN USTREZNIH
METOD ZA ANALIZO INDEKSA TEČENJA
TALINE RAZLIČNIH POLIMERNIH
MATERIALOV**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, november 2025

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**VZPOSTAVITEV MFI NAPRAVE IN USTREZNIH
METOD ZA ANALIZO INDEKSA TEČENJA
TALINE RAZLIČNIH POLIMERNIH
MATERIALOV**

Diplomsko delo

Študentka: Tia RENKO
Študijski program: Tehnologija polimerov
Mentor: viš. pred. Silvester BOLKA
Delovni mentor: Uroš SIMONIČ, mag. inž. str.

Slovenj Gradec, november 2025

IZJAVA

Podpisana Tia Renko izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, 04.02.2026

Podpis: 

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, viš. pred. Silvestru Bolki, in delovnemu mentorju, Urošu Simoniču, mag. inž. str. Posebna zahvala gre Maruši Gregorič za konstantno pomoč pri eksperimentalnem delu. Prav tako se zahvaljujem celotni družini in staršema za podporo tekom študija.

POVZETEK

Vzpostavitev MFI naprave in ustreznih metod za analizo indeksa tečenja taline različnih polimernih materialov

Diplomsko delo temelji na vzpostavitvi naprave za določanje indeksa tečenja taline (MFI – Melt Flow Index) v podjetju Polycom d.o.o. ter na razvoju ustreznih metod za izvajanje analiz različnih polimernih materialov. Namen dela je bil zagotoviti ponovljive in zanesljive rezultate meritev, primerljive z rezultati naprave, ki se uporablja na Fakulteti za tehnologijo polimerov (FTPO). Z uvedbo nove naprave je podjetje pridobilo možnost samostojnega izvajanja rutinskih meritev, kar prispeva k izboljšanju vhodne kontrole kakovosti in k stabilnosti proizvodnega procesa. V teoretičnem delu so predstavljene osnove reologije polimernih materialov, pomen indeksa tečenja taline in dejavniki, ki vplivajo na pretočnost polimerne taline, kot so vrsta polnila, vsebnost steklenih vlaken, aditivi in delež reciklata. Opisana je delovna oprema, uporabljena pri eksperimentalnem delu, s poudarkom na novi MFI napravi v podjetju Polycom ter na primerjavi z napravo, ki jo uporablja FTPO. Eksperimentalni del zajema pripravo vzorcev z različnimi deleži reciklata, njihovo sušenje in izvedbo meritev na obeh napravah. Meritve so bile opravljene na desetih različnih materialih, med drugim tudi na poliamidu (PA6), polipropilenu (PP), polikarbonatu (PC), poliacetalu (POM) in termoplastičnem poliuretanu (TPU). Analiza rezultatov je pokazala, da se vrednosti MFI obeh naprav dobro ujemajo in da so meritve v podjetju Polycom ponovljive ter skladne s standardom ISO 1133. Poseben poudarek je bil namenjen analizi vpliva deleža reciklata v materialu PA6/30 GF. Rezultati so pokazali, da se z večanjem deleža reciklata vrednosti MFI povečujejo, kar nakazuje zmanjšanje viskoznosti materiala zaradi krajšanja polimernih verig. Pri 10 % reciklata je bilo zaznano rahlo povečanje pretočnosti, pri 30 % in 50 % pa je degradacija materiala izrazitejša. S tem je potrjeno, da delež reciklata pomembno vpliva na procesne lastnosti materialov in je ključnega pomena pri določanju optimalnih parametrov brizganja. Primerjava standardnih odklonov med obema napravama je pokazala, da naprava v podjetju Polycom dosega nižje vrednosti standardnih odklonov. Glavna prednost te naprave je avtomatsko spuščanje uteži, ki omogoča enakomerno in ponovljivo obremenitev taline, kar prispeva k večji natančnosti rezultatov. Pri napravi na FTPO uteži spuščamo ročno, kar lahko povzroči manjša odstopanja med ponovitvami, vendar so razlike v mejah dopustne merilne negotovosti. Rezultati diplomskega dela potrjujejo, da je bila vzpostavitev MFI naprave v podjetju Polycom uspešna in da so razvite metode meritev skladne s standardom ISO 1133. Delo pomembno prispeva k izboljšanju kakovostnega nadzora v podjetju in predstavlja podlago za nadaljnji razvoj analiznih metod.

Ključne besede:

Indeks tečenja taline, ISO 1133, analize polimernih materialov, metode MFI, standardni odklon.

SUMMARY

Establishment of an MFI device and appropriate methods for the analysis of the melt flow index of various polymeric materials

The thesis focuses on establishing a Melt Flow Index (MFI) device at Polycom d.o.o. and developing suitable methods for analyzing various polymer materials. The aim was to achieve reproducible and reliable results comparable to those obtained with the device at the Faculty of Polymer Technology (FTPO) and to enable the company to perform routine measurements independently, improving quality control and process stability. The theoretical section outlines the basics of polymer rheology, the significance of MFI, and factors affecting melt flow, such as filler type, glass-fiber content, additives, and recyclate percentage. The experimental part covers sample preparation with different recyclate contents, drying procedures, and measurements carried out on both devices. Ten materials were tested, including polyamide (PA6), polypropylene (PP), polycarbonate (PC), polyacetal (POM) and thermoplastic polyurethane (TPU). Results show strong agreement between both devices, with Polycom achieving reproducible measurements in accordance with ISO 1133. Special attention was given to PA6/30 GF, where increasing recyclate content led to higher MFI values, indicating reduced viscosity due to polymer chain degradation. At 10% recyclate, the increase in flowability was minor, while at 30% and 50% degradation effects were more significant. A comparison of standard deviations revealed lower variability on the Polycom device, primarily due to its automatic weight-release system. The FTPO device requires manual weight release, leading to slight but acceptable deviations. Overall, the successful implementation of the MFI device and the validated measurement methods significantly improve Polycom's quality control and provide a foundation for further analytical development.

Keywords:

Melt flow index, ISO 1133, polymer materials analysis, MFI methods, standard deviation.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Zgodovina in osnove reologije	3
2.1.1	MFI in reologija	5
2.1.2	Vpliv steklenih vlaken	7
2.1.3	Vpliv polnil	9
2.1.4	Vpliv recikliranega materiala	11
2.2	Vrste MFI naprav	14
2.2.1	Opis naprave v podjetju Polycom	15
3	EKSPERIMENTALNI DEL	16
3.1	Materiali	16
3.2	Priprava PA6/ 30GF z različnimi deleži recyklata	16
3.2.1	Kompavdiranje	17
3.2.2	Granuliranje	18
3.2.3	Sušenje	19
3.3	Vzpostavitev MFI naprave v podjetju Polycom	20
3.4	MFI analize – Polycom	20
3.4.1	POM – parametri in analize	22
3.4.2	TPU – parametri in analize	22
3.4.3	PP-H – parametri in analize	23
3.4.4	PA6 / 20 GF – parametri analize	23
3.4.5	PA6 / 30 GF – parametri analize	23
3.4.6	PA6 / 30 GF + 10 recyklata – parametri in analize	24
3.4.7	PC / GF – parametri in analize	24
3.4.8	PPS / 40 GF – parametri in analize	24
3.5	MFI analize - FTPO	24
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	27
4.1	Rezultati in diskusija – POM	27
4.2	Rezultati in diskusija – TPU	28
4.3	Rezultati in diskusija – PP-H	30
4.4	Rezultati in diskusija – PA6 / 20 GF	32
4.5	Rezultati in diskusija – PA6 / 30 GF in recyklati	34
4.6	Rezultati in diskusija – PC / GF	39
4.7	Rezultati in diskusija – PPS / 40 GF	41
4.8	Primerjava standardnih odklonov med napravama	43
5	SKLEP	44
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	46
	SEZNAM SLIK	48
	SEZNAM TABEL	50

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	51
SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	52
PRILOGE	53
Priloga 1: Navodila za uporabo MFI naprave	53

1 UVOD

V zadnjih letih se področje prodaje in uporabe surovih polimernih materialov hitro širi, kar predstavlja izziv številnim podjetjem v polimerni industriji. Z vedno večjim številom dobaviteljev in različnimi kakovostnimi razredi materialov postaja izbira ustreznega polimera ključna za zagotavljanje stabilne kakovosti izdelkov, še posebej v zahtevnih panogah, kot so avtomobilska, letalska, vojaška, medicinska industrija ter industrija bele tehnike. Podjetja se zato vse pogosteje odločajo za lastno preverjanje kakovosti materialov, saj želijo zagotoviti stabilnost proizvodnje in zmanjšati možnost napak, ki bi vodile do reklamacij ali dodatnih stroškov. Eden izmed pomembnih kazalnikov kakovosti polimernih materialov je indeks tečenja taline (MFI – Melt Flow Index), ki opisuje reološko obnašanje polimerne taline pri določeni temperaturi in obremenitvi. MFI je neposredno povezan z molekulsko maso, dolžino polimernih verig, deležem aditivov in polnil ter s procesi, kot je ekstrudiranje, ki lahko povzročajo degradacijo materiala.

V podjetju Polycom d.o.o. smo se v okviru razvoja lastnih analiznih zmogljivosti odločili za nabavo naprave za določanje MFI. Ker metode merjenja na MFI napravi še niso bile popolnoma določene in optimizirane za rutinsko uporabo, je bilo potrebno razviti ustrezne metode za analizo indeksa tečenja taline različnih polimernih materialov ter preveriti natančnost rezultatov v primerjavi z obstoječo napravo na Fakulteti za tehnologijo polimerov (FTPO).

Glavni cilj diplomskega dela je bil določiti in vzpostaviti metode analiz za merjenje MFI različnih polimernih materialov ter primerjati rezultate med obema merilnima napravama – v podjetju Polycom in na FTPO. Poseben poudarek je bil namenjen vplivu deleža reciklata v materialu poliamida 6 (PA6) na vrednosti MFI, saj vsebnost recikliranega materiala pomembno vpliva na procesne lastnosti in kakovost končnih izdelkov. Delo vključuje pripravo vzorcev z različnimi deleži reciklata, sušenje materialov, izvedbo meritev MFI na obeh lokacijah in obdelavo podatkov v programu Microsoft Excel. Pri tem so bili izračunani tudi standardni odkloni za posamezne materiale in pogoji meritev, kar omogoča oceno ponovljivosti meritev in zanesljivosti uporabljene metode. S tem smo lahko ocenili, katera naprava je dala bolj ponovljive rezultate ter kakšne so bile razlike med njima. Ker se MFI naprava v podjetju Polycom nahaja v prostoru z nekoliko drugačnimi pogoji, je bilo potrebno prostor pravilno pripraviti za zagotavljanje pravih okoliščin. Med izvajanjem analiz so se pojavili izzivi, povezani s transportom osušenih vzorcev in natančnostjo tehtanja, kar je bilo treba upoštevati pri interpretaciji rezultatov. S temi cilji smo si zastavili nekaj osnovnih hipotez, in sicer predpostavljali smo, da bomo z opravljenimi meritvami na MFI napravi v podjetju Polycom in ustrezno analizo le teh, dobili nizke standardne odklone, da se bo MFI vzorcev PA6 materiala z dodatkom reciklata, razlikoval glede na delež dodanega reciklata in se bo s tem MFI sorazmerno višal z deležem reciklata ter, da je MFI naprava v podjetju Polycom natančnejša kot MFI naprava na FTPO.

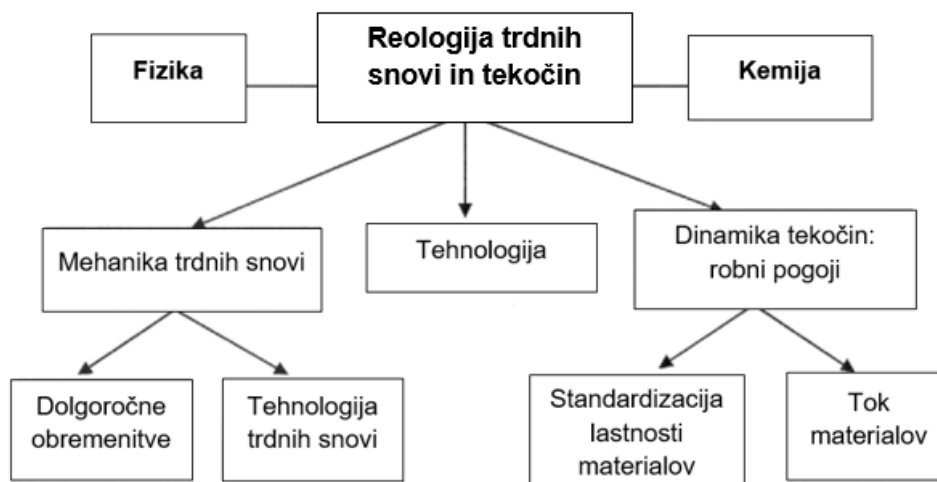
Rezultati diplomskega dela bodo podjetju omogočili učinkovitejšo uporabo nove merilne opreme, boljše razumevanje vpliva recyklata na reološke lastnosti materialov ter prispevali k optimizaciji vhodne kontrole kakovosti v proizvodnem procesu. Hkrati bo delo prispevalo k vzpostavitvi zanesljive metodologije za analizo MFI v podjetju, kar je pomemben korak pri širjenju uporabe okoljsko bolj prijaznih materialov ob ohranjanju kakovosti izdelkov.

Diplomsko delo je razdeljeno na več vsebinskih sklopov. V teoretičnem delu so predstavljene osnove reologije polimernih materialov, pomen meritev MFI ter dejavniki, ki vplivajo na tečenje polimerne taline, kot so vrsta polnila, steklena vlakna, aditivi in delež recyklata. Opisana je tudi uporabljena oprema, s poudarkom na MFI napravi v podjetju Polycom. V eksperimentalnem delu so opisani postopki priprave vzorcev, kompavdiranja, granuliranja, sušenja ter izvedbe meritev na obeh napravah. Sledi poglavje rezultati in diskusija, v katerem so predstavljeni pridobljeni rezultati, njihova primerjava in analiza standardnih odklonov. V zaključnem delu so podane končne ugotovitve, predlogi za izboljšave ter pomen rezultatov za podjetje in širšo industrijsko prakso.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Zgodovina in osnove reologije

Reologija se je kot samostojno naravoslovno področje uveljavila pred več kot sedmimi desetletji, ko so raziskovalci začeli sistematično preučevati nenavadno mehansko vedenje snovi, ki jih tradicionalne kategorije „tekočin“ in „trdnih snovi“ niso mogle zadovoljivo opisati (slika 1). Primeri iz vsakdanjega življenja, kot so barve, glina ali kislomleko, jasno ponazarjajo to kompleksno vedenje. Barve se po nanosu oprimejo sten, glina se pod pritiskom oblikuje kot tekočina, kislomleko pa izkazuje tiksotropno obnašanje, pri katerem viskoznost začasno upade ob mešanju in se po mirovanju ponovno poveča. Tudi beton in polimerni materiali kažejo kombinacijo trdnih in tekočinskih lastnosti, odvisnih od časa in pogojev obremenitve. Podobne izzive opazamo pri farmacevtskih izdelkih, gradbenih tesnilnih sredstvih ali kovinah, ki se pod vplivom zunanjih sil plastificirajo [1].



Slika 1: Reologija kot interdisciplinarna znanost [1]

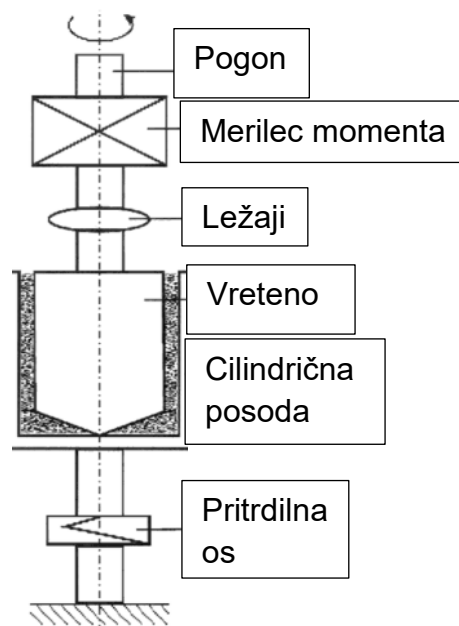
Ti primeri izpostavljajo omejitve klasične binarne delitve snovi in potrebo po novih konceptih, ki so temelj reologije – vede, ki preučuje, kako materiali tečejo in se deformirajo pod vplivom sil. Razumevanje kompleksnega vedenja materialov zahteva metode za opredelitev in merjenje njihovih lastnosti ter razvoj novih eksperimentalnih in teoretičnih pristopov, ki omogočajo tako temeljne raziskave kot tehnološke aplikacije. Ena ključnih značilnosti tehnoloških materialov je prekrivanje lastnosti trdnih in tekočih snovi, pri čemer je mehansko vedenje pogosto odvisno od časovne skale obremenitve [1].

Glavna metodološka usmeritev reologije je modeliranje, ki omogoča kvalitativni ali kvantitativni opis mehanskih lastnosti materialov. Modeli so fenomenološke narave in poenostavljajo realnost, zajemajo pa le tiste lastnosti, ki so ključne za dano analizo. Klasični pojmi „tekočine“ in „trdne snovi“ temeljijo na Newtonovem in Hookeovem zakonu, ki opisujeta sorazmerje med napetostjo in deformacijo oziroma strižno

hitrostjo. Vendar obstaja širok spekter ne Newtonskih in nehookovskih materialov, katerih vedenje odstopa od teh modelov, kar odpira možnosti za raziskave in tehnološke aplikacije [1].

Fenomenološki modeli ne zajemajo notranje strukture materialov, ki so na mikroskopski ravni heterogeni. Materiali se lahko organizirajo v molekularne, kristalne ali supermolekularne strukture, kar pojasnjuje različne mehanske odzive glede na strukturno raven in časovno skalo opazovanja. Reologija se zato posveča tudi strukturiranim snovem, katerih obnašanje se bistveno spremeni pod vplivom sil [1].

Reologija ne preučuje zgolj deformacije in toka, temveč lastnosti materialov, ki določajo njihov odziv. Poseben poudarek je na snoveh z viskoelastičnimi lastnostmi in tistih, katerih se notranja struktura spreminja med obremenjevanjem. Osrednji pojem je obnašanje materiala, tj. razmerje med zunanjo silo in notranjo deformacijo na lokalni ravni kontinuuma, ki ga matematično opiše reološka enačba stanja oziroma konstitutivna enačba. Za realne materiale so pogosto potrebne kompleksnejše enačbe, ki upoštevajo nelinearnost, časovno odvisnost in spremembe notranje strukture [1].



Slika 2: Shema rotacijskega viskozimetra [1]

Poleg tega reologija vzpostavlja povezave med makroskopskimi lastnostmi materiala in njegovo molekularno zgradbo, kar omogoča ocenjevanje kakovosti, razvoj novih snovi in razumevanje temeljnih molekularnih interakcij. Ključen koncept je lestvica opazovanja, ki določa, ali material obravnavamo kot homogen ali heterogen [1].

Reološka analiza se uporablja za reševanje inženirskih problemov, od modeliranja obnašanja materialov pri mehanskih obremenitvah do optimizacije tehnoloških procesov. Nepogrešljiva je pri kovinah, zlitinah, kompozitih, betonu, keramiki, polimerih, živilih, mazivih, farmacevtskih izdelkih, barvah, geoloških in bioloških

materialih. Poseben poudarek je na polimerih, ki predstavljajo več kot polovico strokovnih publikacij na področju reologije [1].



Slika 3: Sodobni rotacijski viskozimeter [2]

Reološko analizo izvajamo z različnimi metodami: metoda kapilarne, metoda rotacijske (slika 2) in metoda padajoče ali valujoče kroglice, pri čemer sodobni viskozimetri in reometri (slika 3) omogočajo dinamične preiskave, visoko občutljivost in širok razpon obratovalnih pogojev, vključno z meritvami elektro- in magnetoreoloških tekočin ter kompleksnih suspenzij [1,3].

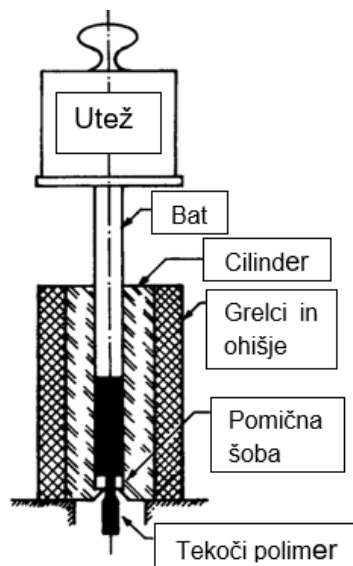
2.1.1 MFI in reologija

Metoda MFI je standardizirana tehnika za določanje pretočnosti termoplastičnih materialov in se pogosto uporablja v industrijski praksi in raziskavah. Poenostavljeno gre za merjenje količine materiala, ki se iztisne skozi matrično šobo znane dolžine in premera iz predhodno segretega cilindra v določenem času, pri čemer na material deluje določena obremenitev (slika 4) [4].

Veljavni standard ISO 1133 določa dva osnovna postopka, to sta masni pretok taline (MFI), kjer se meri masa iztisnjene materiala v določenem času in volumski pretok taline (MVR, ang. Melt Volume Rate), kjer se meri prostornina iztisnjene materiala v določenem času. Rezultat obeh metod je en sam numerični podatek, ki ponazarja pretočnost materiala – višja kot je vrednost masnega pretoka taline (MFI) ali volumskega pretoka taline (MVR), lažje teče material, kar pomeni, da ima nižjo viskoznost. MFI se izraža v enotah g/10 min, MVR pa v cm³/10 min [4].

Izraz indeks tečenja taline se pogosto uporablja kot splošen izraz za obe metodi, pri čemer se za natančno ločevanje med njima uporabljata izraza "masni" ali "volumski" indeks. Metoda MVR ima pomembno prednost pred MFI, saj je neodvisna od gostote

materiala in zato bolj reprezentativna za dejansko pretočnost. To je posebej pomembno pri primerjavi materialov z različnimi vsebnostmi polnil, kjer gostota pomembno vpliva na masni pretok. Polnila običajno bistveno zvišajo gostoto, kar lahko izkrivlja rezultate MFI. Posledično večina podatkovnih baz navaja vrednosti MVR kot standardni merski podatek pretočnosti [4].



Slika 4: Shema preproste MFI naprave [5]

Vsi preskusni pogoji, kot so obremenitev in temperatura, so določeni s standardom ISO 1133. V praksi lahko operater izbira med več obremenitvami in temperaturami, vendar so za posamezne razrede materialov (npr. polipropilen) vnaprej določeni standardni pogoji. Za nekatere materiale, kot je polietilen, je dovoljenih več obremenitev, čeprav je temperatura vedno enaka. Podrobnosti o preskusnih pogojih so navedene v prilogi k standardu, prav tako pa so merila za izbiro obremenitev strogo določena, kar izključuje možnost subjektivne izbire s strani operaterja [4].

Med glavne prednosti metode MFI/MVR spadajo [4]:

- njena preprostost,
- nizki stroški izvajanja,
- hitro pridobivanje podatkov in
- ISO 1133 je standardna metoda, kar omogoča primerjavo rezultatov med laboratoriji in proizvajalci.

Kljub temu ima MFI tudi pomembne omejitve, zlasti pri karakterizaciji nelinearnih ali kompleksno strukturiranih materialov, saj podaja pretok materiala samo v eni točki in s tem ne izvemo reološkega obnašanja materiala, ki se pokaže pri različnih tehnologijah predelave termoplastov [4,6].

2.1.2 Vpliv steklenih vlaken

V tem poglavju smo se osredotočili na iskanje člankov, ki temeljijo na raziskavah in delu povezanim s steklenimi vlakni, polnili in reciklatov v matricah različnih polimerov, in tako ovrednotili pomen le teh na vrednost MFI analiz.

In sicer v šoli za znanosti o materialih in inženirstvu, Fakulteti za metalurgijo materialov in kemijo in Jiangxi univerzi za znanost in tehnologijo, je skupina raziskovalcev predstavila učinkovito strategijo za zasnovo visoko zmogljivih poliamidov 6 in poliamidov 1012 (PA6 / PA1012) kompozitov, ki temelji na [7]:

- medfazni optimizaciji z uporabo kompatibilizatorja etilen-oktena kopolimera, cepljenega z maleinskim anhidridom (POE-*g*-MEH),
- ojačitvi z vlakni in
- funkcionalizaciji z dodatki.

Strategijo so pripravili na osnovi kompozitov najlona 6 in najlona 1012 (PA6 / PA1012) z različno vsebnostjo steklenih vlaken, z uporabo dvopolžnega ekstruderja. Z namenom izboljšanja medfazne združljivosti med PA6 in PA1012 je bil sistemu dodan 1,5 % POE-*g*-MAH. Analiza z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) je potrdila izboljšano disperzijo PA1012 v PA6 matrici, kar kaže na učinkovito medfazno vezavo [7].

Z dodatkom do 30 % steklenih vlaken so se bistveno izboljšale mehanske lastnosti kompozita [7]:

- natezna trdnost: povečanje za 153 %,
- upogibna trdnost: povečanje za 305 % in
- temperatura toplotne deformacije: povečanje za 275 % (v primerjavi s čistim PA6).

Optimizirana formulacija je dosegla MFI 26,7 g/10 min (merjeno pri 260 °C / 2,16 kg), kar predstavlja 180 % zvišanje v primerjavi z referenčnimi materiali. Ta lastnost omogoča učinkovito brizganje kompleksno oblikovanih komponent. Za izboljšano odpornost na okoljske vplive sta bila dodana UV-stabilizatorja, ki sta omogočila ohranitev več kot 79,3 % udarne žilavosti po 500 urah UV-staranja, kar presega zmogljivosti konvencionalnih sistemov [7].

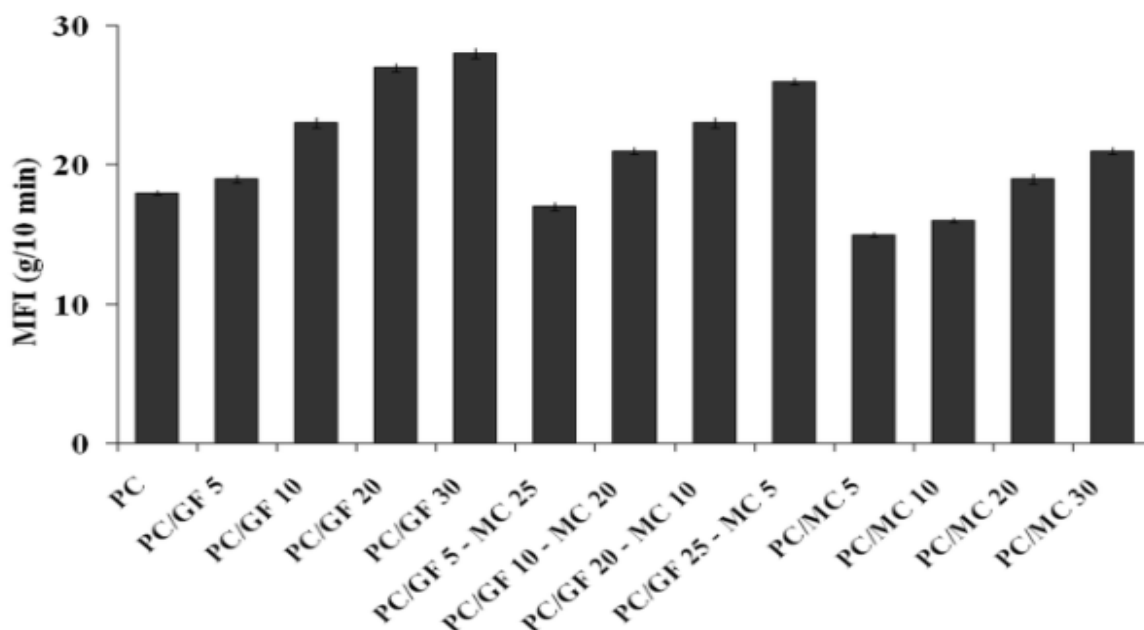
Poleg tega kompozit odlikujeta [7]:

- nizka ravnotežna absorpcija vode: 1,20 % in
- visoka dimenzijska stabilnost: temperatura držanja oblike (ang Heat deflection temperature HDT) = 210 °C.

Ti parametri potrjujejo primernost materiala za strukturne avtomobilske komponente, kot so nosilci vzratnih ogledal, kjer so zahtevani visoka mehanska trdnost, toplotna odpornost in obstojnost na vremenske vplive [7].

Na Atilim univerzi, v Oddelku za kemijsko inženirstvo in aplikativno kemijo, so v okviru raziskovalnega dela preučevali lastnosti hibridnih polikarbonatnih kompozitov, ki so vsebovali steklena vlakna in kosmiče mice. Namen raziskave je bil določiti vpliv različnih vrst in deležev polnil na reološke, mehanske ter termične lastnosti polikarbonata [8].

Matrica kompozitov je bila polikarbonatna, vanjo pa so dodajali različne koncentracije steklenih vlaken in kosmičev mice. Tako so dobili vzorce polikarbonata s 5 % steklenih vlaken (PC/GF 5), z 10 % steklenih vlaken (PC/GF 10), 20 % (PC/GF 20) in s 30 % (PC/GF 30), naredili so tudi vzorce z dodatkom mice, te so polikarbonat s 5 % steklenih vlaken in 25 % mice (PC/GF 5 - MC 25), polikarbonat z 10 % steklenih vlaken in 20 % mice (PC/GF 10 - MC 20), polikarbonat z 20 % steklenih vlaken in 10 % mice (PC/GF 20 - MC 10), prav tako so naredili kombinacijo s 25 % steklenih vlaken in 5 % mice (PC/GF 25 - MC 5), na koncu pa še polikarbonat s 5 %, 10 %, 20 % in 30 % dodane mice (PC/MC 5, PC/MC 10, PC/MC 20 in PC/MC 30). Vzorci so bili pripravljene s postopkom kompandiranja in nadaljnjo obdelavo z brizganjem. Med ključnimi meritvami je bila določitev MFI po standardu ISO 1133 izvedena pri temperaturi 300 °C in pod obremenitvijo med 1,2 kg in 2,16 kg. Poleg tega so bile opravljene tudi mehanske in termične analize, vključno z diferencialno dinamično kalorimetrijo (DSC) in termogravimetrično analizo (TGA) [8].



Slika 5: Graf MFI v odvisnosti od dodatka mice in steklenih vlaken [8]

Rezultati so pokazali, da dodajanje kosmičev mice povzroči zmanjšanje MFI v primerjavi s čistim polikarbonatom, medtem ko dodajanje steklenih vlaken zviša MFI. Z naraščajočo vsebnostjo polnil se je zvišala viskoznost taline, kar je povzročilo slabšo pretočnost in obratno (slika 5). Mehanske analize so pokazale, da prisotnost polnil povečuje togost in trdnost kompozitov, vendar zmanjšuje udarno žilavost zaradi

nastanka mest koncentracije napetosti na vlaknih in ploščicah. Termične analize so razkrile, da je višja vsebnost polnil izboljšala termično stabilnost kompozitov, medtem ko se steklasti prehod (T_g) ni bistveno spreminjal, kar kaže, da polnila ne vplivajo izrazito na mobilnost polimernih verig [8].

Skupni zaključki raziskave potrjujejo, da kombinacija steklenih vlaken in kosmičev mice omogoča uravnotežen kompromis med mehanskimi in reološkimi lastnostmi. Hibridna polnila tako izboljšajo trdnost in stabilnost materiala, ne da bi bistveno zmanjšala pretočnost, kar je posebej pomembno pri industrijskih aplikacijah, kjer je obdelovalnost materiala ključnega pomena [8].

2.1.3 Vpliv polnil

Kot omenjeno, so polimerni kompoziti v kombinaciji s steklenimi vlakni v avtomobilski industriji zelo pomembni, saj prispevajo k zmanjšanju mase vozil, kar neposredno vpliva na manjšo porabo goriva, nižje emisije ogljikovega dioksida (CO_2) ter manjše onesnaževanje okolja. Med najbolj perspektivnimi materiali so visoko trdni kompoziti iz poliamida in steklenih vlaken (PA/GF). Kljub velikemu potencialu njihova širša uporaba ostaja omejena zaradi nezadostne reološke učinkovitosti, kar je spodbudilo raziskave vpliva dodatnih polnil in modifikatorjev [9]. Povzetek raziskave z recepturami in reološkimi lastnostmi je prikazan v tabeli 1.

Na South-Central Minzu Univerzi so zasnovali hiperrazvežani poliester (HBP-12-n) z aromatskim koncem in ga uporabili v visokozmogljivih kompozitih poliamida 6 (PA6), ojačanih s steklenimi vlakni (GF). Pretočnost teh kompozitov je bila dodatno izboljšana z združitvijo hiperrazvežanega polimera s karboksilnim koncem (HyPer C181) s HBP-12-n. V primerjavi z nemodificiranimi kompoziti PA6/GF je dodatek 0,7 masnega deleža zmesi HBP-12-75 in HyPer C181 povzročil kar 587 % povečanje MFI, pri čemer sta mehanski lastnosti (trdnost in žilavost) ostali primerljivi [9].

Dodatek hiperrazvežanih polimerov HBP-12-n v GF/PA6 kompozite poveča MFI za približno 12,7 % – 13,3 %, pri čemer višja stopnja esterifikacije polimera dodatno izboljša rezultate. Optimalna stopnja esterifikacije znaša 75 %, saj omogoča najboljše ravnotežje med povečanjem MFI in mehanskimi lastnostmi (natezna trdnost, upogibna trdnost, udarna trdnost) [9].

Kombinirana uporaba reaktivnega modifikatorja HyPer C181 in hiperrazvežanega polimera HBP-12-75 omogoča še izrazitejše izboljšave. Na primer, kompozit GP-18 (0,18 % HyPer C181 + 0,52 % HBP-12-75) doseže MFI 24,46 g/10 min, kar pomeni 107,8 % povečanje glede na referenčni vzorec GP-0 (11,77 g/10 min). Pri kompozitu GP-07 (0,07 % HyPer C181 + 0,63 % HBP-12-75) so bile dosežene najbolj uravnotežene lastnosti, saj se je MFI povečal za 43,4 %, mehanske lastnosti pa so ostale stabilne. Pri zelo visokih koncentracijah dodatkov (5 t%) je dosežena ultravisoka pretočnost taline, in sicer 587,1 % povečanje MFI v primerjavi z GP-0 [9].

Povečanje MFI je posledica sinergijskega delovanja HBP-12-n in HyPer C181. Amfifilna struktura HBP-12-n omogoča učinkovite interakcije med PA6 matrico in steklenimi vlakni, medtem ko njegova hiperrazvejana topologija zmanjšuje notranje trenje in omogoča lažje drsenje polimernih verig. Vodikove vezi med –OH skupinami HBP-12-75 in –COOH skupinami HyPer C181 dodatno izboljšujejo disperzijo vlaken, kar še zvišuje pretočnost taline [9].

Posledično ultravisoka pretočnost omogoča učinkovitejše brizganje večjih ali kompleksno oblikovanih komponent, pri čemer mehanske lastnosti ostanejo primerljive, termična stabilnost ter kristalna struktura PA6 pa skoraj nespremenjeni. To pomeni, da povečanje MFI ne kompromitira osnovnih lastnosti materiala [9].

Tabela 1: Vpliv polnil na MFI PA6 [9]

Oznaka kompozita	Vsebnost HBP-12-75 (%)	Vsebnost HyPer C181 (%)	MFI (g/10 min)	Povečanje MFI glede na GP-0
GP-0	0	0	11,77	–
GP-75	0,70	0	≈ 22,8*	+587 % (pri 5 % dodatka)
GP-18	0,52	0,18	24,46	+107,82 %
GP-07	0,63	0,07	≈ 16,9*	+43,4 %
GP-5 (mešani dodatek 5 %)	HBP+HyPer 5 %	–	≈ 79,5*	+587,1 %

Na Univerzi v Maliju (Reuleut Timur) in Univerzi Syiah Kuala (Darussalam) so izvedli raziskavo, v kateri so preučevali vpliv različnih dodatkov na lastnosti modificiranega termoplastičnega škroba (TPS), pripravljenega iz sagovega škroba. V raziskavi so v TPS dodajali polipropilen (PP), polietilen (PE), ricinusovo olje ter palmino olje, pri čemer so nastale različne vrste TPS-kompozitov. Njihove lastnosti so ovrednotili z analizo indeksa talilne prostornine (MFI), rezultate pa med seboj primerjali [10].

Rezultati (tabela 2) so pokazali [10]:

- dodatek PE ali PP bistveno poveča MFI, kar kaže na izboljšano pretočnost in nižjo viskoznost v primerjavi z osnovnim TPS,
- najnižji MFI je bil dosežen pri TPS z ricinusovim oljem, kar nakazuje visoko viskoznost in omejeno predelovalnost in
- najvišji MFI je bil izmerjen pri TPS z dodatkom PE, kar pomeni večjo plastičnost materiala ter možnost obdelave pri nižjih tlakih in temperaturah.

Tabela 2: Vpliv dodatkov na MFI termoplastičnega škroba [10]

Tip materiala	Parametri MFI	Rezultati MFI
TPS + polipropilen	[230°C/2,16 kg]	10,9 ± 0,1
TPS + polietilen	[190°C/2,16 kg]	13,5 ± 0,1
TPS + palmino olje	[150°C/10 kg]	2,5 ± 0,1
TPS + ricinusovo olje	[150°C/10 kg]	0,6 ± 0,1

2.1.4 Vpliv recikliranega materiala

Recikliranje odpadne plastike se v sodobni industriji uveljavlja kot ključna strategija za zmanjševanje okoljskega odtisa in doseganje trajnostnih ciljev. V tem kontekstu se vpliv recikliranih materialov na reološke lastnosti, predvsem na MFI, vse pogosteje preučuje kot pomemben kazalnik kakovosti sekundarnih (recikliranih) polimerov. Ena izmed raziskav, ki se osredotoča na ta pojav, je bila izvedena na Politehniku Astra v Cikarangu, Indonezija, v sodelovanju med Oddelkom za strojništvo in industrijo ter Oddelkom za certificiranje in kompetence [11,12].

V raziskavi so analizirali spremembe MFI kot posledico večkratnega recikliranja PP, s čimer so želeli ugotoviti vpliv stopnje reciklaže na reološke lastnosti materiala. MFI je bil izbran kot primarni indikator sprememb viskoznosti, saj že majhne spremembe v strukturi polimerne verige, ki nastanejo zaradi toplotno-mehanskega stresa med reciklažnimi cikli, lahko vplivajo na talilno obnašanje materiala. Analizirani vzorci so bili podvrženi do šest zaporednih ciklov recikliranja. Po vsakem ciklu je bila izmerjena nova vrednost MFI. Rezultati (tabela 3) so pokazali, da se vrednost MFI v prvih dveh ciklih reciklaže ni bistveno spremenila. V tretjem in četrtem ciklu pa je prišlo do izrazite spremembe – MFI se je povečal za približno štirikrat v primerjavi z začetno vrednostjo. Po šestem ciklu recikliranja se je MFI povečal celo do sedemkrat, kar kaže na znatno znižanje povprečne molekulske mase zaradi verižne degradacije in s tem zmanjšano viskoznost. Poleg reoloških sprememb so bili pri večkratno recikliranem PP opaženi tudi vizualni učinki, kot je temnenje barvnega odtenka, kar kaže na možne degradacije med obdelavo. Ti rezultati poudarjajo potrebo po skrbni kontroli števila reciklažnih ciklov ter po dodatni karakterizaciji reciklatov, kadar se ti vključujejo v nove industrijske aplikacije. MFI analiza se pri tem izkazuje kot učinkovito diagnostično orodje za spremljanje kakovosti recikliranega materiala in oceno njegove uporabnosti za nadaljnjo predelavo [11].

Tabela 3: Vpliv recikliranja na MFI polipropilena [11]

	Cikel 1	Cikel 2	Cikel3	Cikel 4	Cikel 5	Cikel 6
	MFI (g/10 min)	MFI (g/10 min)	MFI (g/10 min)	MFI (g/10 min)	MFI (g/10 min)	MFI (g/10 min)
Vzorec 1	10	14,8	41,4	43,8	67,8	79
Vzorec 2	13	13	42	39	66	76
Vzorec 3	12	14	40,8	37,8	61,8	71

Recikliranje zagotavlja cenovno ugodno oskrbo z materialom ter preprečuje onesnaževanje okolja in omogoča ohranjanje virov. Kvantifikacija sprememb lastnosti materialov zaradi recikliranja je ključni vidik pri vzpostavljanju krožnega gospodarstva, saj omogoča razumevanje vpliva uporabe recikliranih materialov na proizvodnjo in izdelke. Doslej so raziskave in industrija preučevale uporabo recikliranih materialov za surovine in inženirske polimere. Za visoko zmogljive plastike pa to znanje obstaja le v laboratorijskem merilu [12].

Na Univerzi v Siegnu je potekala raziskava glede vpliva reciklaže polifenilen sulfida (PPS) ojačanega z vlakni, ki je eden visoko zmogljivih polimerov [12].

Meritve MFI so bile opravljene v skladu s standardom EN ISO 1133-1,-2 (a), (b). Za merjenje MFI je bil uporabljen tester za merjenje pretoka taline INSTRONMF20. Za vsak material je bilo opravljenih skupno pet meritev (tabela 4). Pred tem so bili materiali enakomerno posušeni, da se izključi vpliv vlage na določanje vrednosti MFI. Vsebnost preostale vlage pred meritvami MFI je bila za vse materiale določena kot 0,04 %. Z izračunom aritmetične sredine iz posameznih meritev MFI je bila pridobljena predhodna indikativna vrednost materiala. V skladu s standardom EN ISO 1133-1 je bila meritev MFI izvedena na naslednji način: na začetku je bil merilnik pretoka taline segret na preskusno temperaturo 320 °C za najmanj 15 min. Preskusna temperatura je bila izbrana na podlagi tehničnih listov materiala. Nato je bil merilnik pretoka taline napolnjen z 8 g ustreznega granulata. Med polnjenjem merilnika pretoka taline je bil vzorec večkrat ročno stisnjen, da bi se zagotovilo polnjenje brez zraka. Po 5 minutnem segrevanju je bil vzorec stisnjen z maso 5 kg [12].

Tabela 4: Vpliv reciklata na PPS [12]

Material PPS	Delež reciklata (%)	MFI (g/10 min) ± SD	Opomba
VM (primarni material)	0	24,7 ± 11,4	Najnižja pretočnost
Rec (delni reciklat)	50	88,6 ± 0,9	Opazno povečanje pretočnosti
Reg (reciklat)	100	101,6 ± 5,8	Najvišja pretočnost

Rezultati meritev MFI kažejo na posredno povezavo med vsebnostjo recikliranega materiala in vrednostjo MFI. Primarni material (VM) je pokazal najnižjo vrednost MFI, 24,7 ± 11,4 g/10 min, 50 % reciklata (Rec) je pokazal MFI 88,6 ± 0,9 g/10min. 100% reciklata PPS material (Reg) kaže najvišjo vrednost MFI 101,6 ± 5,8 g/10min. Posledično, če reciklirani materiali v enakih pogojih predelave lažje tečejo, je bil potreben manjši tlak brizganja pri izdelavi vzorcev za testiranja. Tudi za vrednosti MFI so bili izvedeni statistični testi za zagotovitev statistične pomembnosti med opazovanimi razlikami. Za testirane materiale je bilo mogoče dokazati, da se povprečne vrednosti MFI, pridobljene iz petih ponovitev, med seboj pomembno razlikujejo za vse testirane materiale. Vrednost MFI predstavlja pretočne lastnosti polimerov pri dani temperaturi in strižni obremenitvi. Vrednosti MFI, ki so bile ovrednotene iz materialov PPS, ojačanih s steklenimi vlakni v tej študiji, kažejo jasno povezavo med vsebnostjo recikliranih materialov in dobljeno vrednostjo MFI. Pri 50-

odstotnem recikliranem materialu (Rec) je bil MFI bistveno višji od MFI primarnega materiala (VM). Najvišji MFI je dosegel 100-odstotni reciklat (Reg) [12].

2.2 Vrste MFI naprav

Za merjenje MFI so na voljo različni tipi naprav, zasnovani za različne potrebe laboratorijev in industrijskih obratov. Glavna delitev temelji na stopnji avtomatizacije, ki jo naprave ponujajo, in zajema tri osnovne kategorije. To so ročni testerji MFI, najosnovnejša vrsta naprav, ki zahtevajo aktivno sodelovanje operaterja v vseh fazah postopka. To vključuje, ročno polnjenje cilindra z vzorcem, nastavitve in nadzor temperature, nanašanje uteži in ročno merjenje količine iztisnjene materiala. Prednosti so nižja nabavna cena, enostavno vzdrževanje in zanesljivo delovanje za osnovne meritve. K prednostim pa spadajo tudi slabosti, kot so večja možnost napak zaradi človeškega dejavnika, manjša ponovljivost rezultatov, višja delovna obremenitev operaterja [13].



Slika 6: Polavtomatski tester pretoka taline [13]

Sledijo polavtomatski testerji MFI (slika 6), ki predstavljajo kompromis med ročnimi in popolnoma avtomatiziranimi sistemi, saj avtomatizirajo ključne segmente merilnega postopka, kot so nadzor temperature, časovni nadzor ekstrudiranja, samodejno beleženje rezultatov. Pri teh MFI testerjih operater še vedno ročno naloži vzorec in nastavi uteži, vendar naprava samodejno spremlja potek preizkusa in opravi meritev količine iztisnjene materiala. Prednosti tega so izboljšana ponovljivost in natančnost meritev, manjše možnosti za napake, optimalno razmerje med ceno in zmogljivostjo [13].

Tretja kategorija so popolnoma avtomatski testerji MFI. Predstavljajo najvišjo raven avtomatizacije, saj avtomatizirajo celoten testni postopek, vključno z avtomatskim nalaganjem vzorca, nadzorom temperature in tlaka, nanašanjem uteži, časovnim spremljanjem in beleženjem podatkov ter izračunom MFI/MVR vrednosti [13].

2.2.1 Opis naprave v podjetju Polycrom

Naprava Automatic MFR MVR Plastic Melt Flow Index Tester (slika 7) je napreden instrument za merjenje MFI polimernih materialov. Običajno se uporablja za določanje MFI ali MVR pri različnih termoplastih, kot so polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), poliamid (PA), akril, POM, fluoroplastika in polikarbonat (PC) [14].



Slika 7: Automatic MFR / MVR Plastic Melt Flow Index Tester [15]

Značilnosti naprave so [15]:

- temperaturni razpon: do 400 °C,
- natančnost temperature: $\pm 0,2$ °C,
- ločljivost prikaza temperature: 0,1 °C,
- čas okrevanja temperature: manj kot 4 minute,
- poraba moči: manj kot 600 W,
- dimenzije naprave: 250 × 510 × 350 mm,
- masa vzorca: natančnost tehtanja $\pm 0,5$ % in
- uteži za testiranje: različne konfiguracije, 0,325 kg, 1 kg, 2,1 kg, 3 kg, 5 kg, 10 kg, 12 kg, 21,6 kg.

Naprava omogoča natančno določanje MFI ali MVR, kar je ključno za kakovostno zagotavljanje preverjanja doslednosti lastnosti materialov med proizvodnjo, raziskave in razvoj analiz vpliva različnih parametrov. Preverjanje lastnosti surovin pred obdelavo in optimizacija procesov predelave [15]. Sama naprava nudi natančno kontrolo temperature in hitro okrevanje med temperaturnimi zamiki. Ima tudi vgrajen tiskalnik za samodejno tiskanje rezultatov, LCD zaslon, avtomatsko rezanje materiala in nastavljanje uteži [14].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Materiali

Za eksperimentalni del naloge smo določili sedem osnovnih materialov, polioksimetilen (POM), termoplastični poliuretan (TPU), homopolimer polipropilen (PP-H), poliamid 6 z 20 % steklenih vlaken (PA6/ 20 GF), poliamid 6 s 30 % steklenih vlaken (PA6/ 30 GF), polikarbonat z neznanim deležom steklenih vlaken, polipropilen sulfid s 40 % steklenih vlaken in tri kompavdirane iz osnovnega materiala PA6/ 30 GF z dodatkom reciklata (PA6/ 30 GF + 10r, PA6/ 30 GF + 30r in PA6/ 30 GF + 50r). Tako smo dobili deset materialov (tabela 5). Vsakega smo analizirali z MFI napravo v Polycomu in na Fakulteti za tehnologijo polimerov (FTPO) in jim določili vrednosti MFI ob uporabi različnih uteži. Vsak material smo testirali s štirimi različnimi masami uteži ob konstantni temperaturi, kar nam je dalo 40 vzorcev oziroma 120 analiz za obe napravi posebej, saj smo za vsak vzorec naredili 3 paralelke zaradi ponovljivosti in samega določanja standardnega odklona (STD) in primerjavo le teh med napravama.

Tabela 5: Seznam materialov

Vrstni red	Material
1	POM
2	TPU
3	PP-H
4	PA6 / 20 GF
5	PA6 / 30 GF
6	PA6 / 30 GF + 10r
7	PA6 / 30 GF + 30r
8	PA6 / 30 GF + 50r
9	PC / GF
10	PPS / 40 GF

3.2 Priprava PA6/ 30GF z različnimi deleži reciklata

Za pripravo materialov z različnimi deleži reciklata (slika 8) smo si določili mase vsake komponente (tabela 6) za lažjo organizacijo in čim manjšo potrošnjo z materialom.

Tabela 6: Priprava vzorcev PA6/ 30 GF

	Osnovni material PA6/ 30 GF (%)	Reciklat (%)
PA6/ 30 GF + 10r	90	10
PA6/ 30 GF + 30r	70	30
PA6/ 30 GF + 50r	50	50



Slika 8: Pripravljena mešanica PA6/ 30 GF + reciklat

3.2.1 Kompavdiranje

Kompavdiranje nastavljenih vzorcev smo izvedli na napravi 26 Compaunder (slika 9).



Slika 9: Industrijski kompavnder

Naprava vsebuje dva med seboj prepletena polža, ki se vrtita znotraj ogrevane cilindrične komore. Pri modelu 26 Compaunder gre za laboratorijski ali manjši industrijski kompavnder, ki omogoča natančen nadzor nad procesnimi parametri in prilagoditev konfiguracije polžev glede na obdelovan material [16].

Da smo naredili vzorce, smo kompavnder predhodno segreli na temperature predpisane za material (tabela 7).

Tabela 7: Temperatura kompavdiranja

Cona	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Šoba
Temperatura (° C)	215	215	215	220	220	220	225	225	225	230	230	230

Napravo smo pustili, da se segreje in stabilizira, med tem smo nastavili ostale parametre potrebne za kompavdiranje (tabela 8). Te so pomembni, saj imamo že v osnovi zelo visoke temperature in bi z nepravilnimi parametri degradirali material.

Tabela 8: Parametri kompavnderja

Obrati polža (obr./ min)	Obrati lijaka (obr./ min)
200	30

Po segretju smo v lijak nasuli mešanico granulata in recyklata (slika 10), mešanica polimera se je stalila in pritekla skozi šobo. Šoba ima 4 prehode in s tem dobimo večjo kapaciteto niti in hkrati kasneje tudi granulata (slika 11).

*Slika 10: Lijak kompavnderja**Slika 11: Šoba kompavnderja (levo) in vodna kopel (desno)*

3.2.2 Granuliranje

Postopek granuliranja smo naredili z granulatorjem (slika 12) z naslednjimi parametri (tabela 9).



Slika 12: Granulator

Tabela 9: Parametri granulatorja

Hitrost (m/ min)	Dolžina ene granule (mm)
18	2,8

3.2.3 Sušenje

Vsak narejen vzorec smo sušili v mobilni sušilni enoti na vroči zrak proizvajalca Motan Luxor (slika 13), v podjetju bi lahko uporabili katerikoli sušilec, saj so vsi istega proizvajalca, razlikujejo se samo v kapaciteti posušenega materiala. Vzorci so vsi enakega materiala, zato, parametre sušenja, nismo spreminjali (tabela 10).



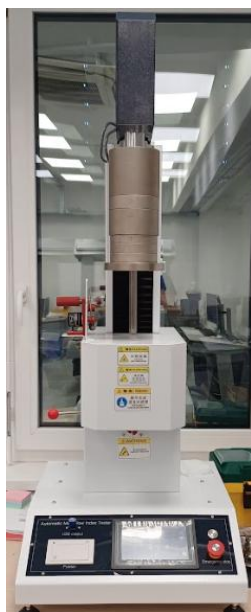
Slika 13: Mobilni sušilnik

Tabela 10: Parametri sušenja vzorcev

Temperatura sušenja (°C)	Čas sušenja (ura)
80	4

3.3 Vzpostavitev MFI naprave v podjetju Polycom

Kot že omenjeno se je podjetje Polycom odločilo za nakup naprave za merjenje pretoka indeksa taline polimernim materialom, Automatic MFR MVR Plastic Melt Flow Index Tester. Napravo so postavili v oddelek za kontrolo in kakovost, kjer smo jo namestili na ravno površino in ji nastavili uteži, saj te niso bile nameščene kot ostali deli naprave. Uteži kot celotna naprava so izdelane skladno s standardom ISO 1133. Ker navodil za nastavljanje uteži ni bilo priloženih, smo potrebovali nekaj časa, da smo prišli do varnega načina postavitve (slika 14). Naredili smo testne analize na enostavnih materialih (brez vlaken in nizke predelovalne temperature). Ter te primerjali s podanimi MFI vrednostmi s tehnoloških listov materiala. Po nekaj uspešnih poizkusih smo naredili navodila za uporabo (priloga 1), katera ne vključujejo le kako izvedemo meritve, temveč tudi kako pravilno napravo očistimo. Z navodili lahko analizo opravi vsak, ki se prvič sreča tako z napravo kot s samim postopkom.



Slika 14: Postavljena MFI naprava

3.4 MFI analize – Polycom

Ko smo imeli pripravljene vse vzorce, smo začeli z analizami. Začeli smo pri uporabi vlagomera (slika 15), ki je služil za sušenje materiala. Ta, v primerjavi z vlagomerom na FTPO, deluje na drugačen princip, in sicer s pomočjo higroskopičnega materiala kalcijevega hidrata (slika 16), kateri iz polimera absorbira celotno vlago in ga tako posuši.



Slika 15: Vlagomer Polycom



Slika 16: Kalcijev hidrat

Maso materiala, ki smo ga dali posušiti smo razbrali iz tabele, ki je navedena v standardu ISO1133 (tabela 11). Po njej smo se ravnali skozi celotne analize.

Tabela 11: Masa vzorca glede na pričakovan MFI

Pričakovan MFI (g / 10 min)	Masa vzorca v cilindru (g)
> 0,10 do ≤ 0,15	3 do 5
> 0,15 do ≤ 0,40	3 do 5
> 0,40 do ≤ 1,00	4 do 6
> 1,00 do ≤ 2,00	4 do 6
> 2,00	5 do 8
> 5,00	5 do 8

Ko se je material posušil, smo ga natresli v čisto plastično vrečko in ga tako zaščitili pred možno kontaminacijo z vlago iz zraka. Premestili smo se v prostor z MFI napravo in pričeli z analizo. V predhodno segretem cilindru, katerega temperaturo smo razbrali s tehničnega lista materiala, smo nasuli posušen material. Potrebno je bilo počakati da se ta stali (240 s). V tem času smo nastavili parametre analize, in sicer koliko odrezkov bomo dobili in koliko časa je potrebno za odrez enega odrezka in maso uteži, s katero bomo začeli. Ko se je vzorec stalil, se je analiza lahko pričela. Parametre smo si beležili, saj smo jih potrebovali pri določanju metode za materiale. Ko smo dobili odrezke, smo jih stehali na precizni tehnic, povprečje le teh pa smo vnesli v napravo

in dobili izračun MFI. Čeprav ima večina MFI naprav avtomatski izračun indeksa tečenja taline, je potrebno omeniti, po kateri formuli se ta izračuna (enačba 1).

$$MFI = \frac{m}{t} \cdot 600 \text{ s} \quad (1)$$

pri čemer je:

- m - masa iztisnjenega polimera (g)
- t - čas enega odrezka (s)
- 600 s - pretvornik v 10 min

Pred delom se je potrebno pozanimati, ali poznamo povezavo med indeksom tečenja taline MFI in volumenskim masnim pretokom MVR, saj so velikokrat v podatkih na tehnoloških listih materialov podani MVR podatki in ne MFI. Za primerjavo podatkov pa je potrebno vedeti MFI. Tega izračunamo po naslednji enačbi 2.

$$MFI = MVR \cdot \rho \quad (2)$$

pri čemer je:

- MVR - volumenski masni pretok taline (cm³/10 min)
- ρ - gostota polimera (g/cm³)

Postopek smo naredili za vse vzorce in tako dobili parametre ter rezultate analize. Vrstni red materialov je prikazan v tabeli 5.

3.4.1 POM – parametri in analize

Za analizo POM materiala smo uporabili temperaturo 190 °C in tri uteži od 1,2 kg, 2,16 kg in 3,8 kg. Zaradi dolžine odrezkov, ki morajo biti dolgi od 1 do 2 cm, parametrov dolžine in števila odrezkov nismo spreminjali, saj so te bili znotraj določene dolžine skozi celotne analize (tabela 12). Za vsako utež smo naredili tri meritve, za material POM pa naredili 9 meritev.

Tabela 12: POM – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
190	1,2	7 – 8	5	10
190	2,16	7 – 8	5	10
190	3,8	7 – 8	5	10

3.4.2 TPU – parametri in analize

Pri TPU materialu smo se zaradi njegove visoke viskoznosti odločili za analize pri več različnih utežeh, s tem smo tudi spreminjali parametre odrezavanja in intervala odrezavanja zaradi vpliva strižne hitrosti na material (tabela 13). Analize smo merili pri 200 °C.

Tabela 13: TPU – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
200	2,16	7 – 8	40	10
200	3,8	7 – 8	30	10
200	5	7 – 8	30	10
200	10	7 – 8	8	10
200	12,5	7 – 8	7	10
200	21,6	7 – 8	5	10

3.4.3 PP-H – parametri in analize

Za analize PP-H materiala, smo uporabili že rahlo višjo temperaturo, in sicer 230 °C. Parametrov analize prav tako nismo spreminjali, saj je dolžina odrezkov tokom analize ostajala znotraj dovoljene dolžine (tabela 14).

Tabela 14: PP-H – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
230	1,2	7 – 8	5	10
230	2,16	7 – 8	5	10
230	3,8	7 – 8	5	8
230	5	7 – 8	5	5

3.4.4 PA6 / 20 GF – parametri analize

Material PA6 / 20 GF ima nizko viskoznost in s tem smo določili, da je uporaba pretežkih uteži odvečna, saj ga je težko analizirati, kajti hitro teče. S tem smo si zadali sredinske uteži od 2,16 do 10 kg. Temperatura je bila konstantna, in sicer 230°C, ostale parametre smo spreminjali po potrebi (tabela 15).

Tabela 15: PA6 / 20 GF – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
230	2,16	7 – 8	7	5
230	3,8	7 – 8	5	5
230	5	7 – 8	5	5
230	10	7 – 8	5	5

3.4.5 PA6 / 30 GF – parametri analize

PA6 / 30 GF je material, s katerega smo naredili tri različne verzije materialov, in sicer z 10 %, 30 % in 50 % dodanega reciklata. Tako smo lahko ugotovili, kako različni deleži dodanega reciklata vplivajo na viskoznost polimera. Temu v prid smo morali analizirati tudi osnovni material. Odločili smo se za tri različne uteži, 2,16 kg, 3,8 kg in 5 kg, saj je bil že osnoven material zelo tekoč in ga je bilo težko pomeriti s težjimi utežmi, velik vzrok temu ima tudi temperatura, saj smo morali uporabiti kar 275 °C (tabela 16), (takšni parametri so bili podani na tehničnem listu materiala).

Tabela 16: PA6 / 30 GF – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
275	2,16	7 – 8	5	5
275	3,8	7 – 8	5	5
275	5	7 – 8	5	4

3.4.6 PA6 / 30 GF + 10 reciklata – parametri in analize

Nadaljevali smo z istim materialom, katerega smo kompavndirali z 10% reciklata. Pri tem smo pričakovali nekoliko višje MFI pri vseh utežeh. Uporabili smo enake parametre, da nismo izgubili sledljivosti analiz (tabela 20). Analize so podane v tabeli 22. Analize smo ponovili pri naslednjem vzorcu s 30 % dodanega reciklata. Večje težave so se nam pojavile pri analizah PA6 / 30GF s 50 % reciklata, saj je material zelo tekoč in smo s tem pričakovali visok MFI. Imeli smo predlog, da bi znižali temperaturo za 5 °C a se nismo odločili zanj, kajti bi s tem izgubili sled primerjave s primarnim materialom. Parametri so zapisani v tabeli 16.

3.4.7 PC / GF – parametri in analize

Po opravljenih analizah na poliamidnih materialih smo analizirali polikarbonat s steklenimi vlakni. Parametri so podani v tabeli 17.

Tabela 17: PC / GF – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
300	1,2	6 - 7	5	7
300	2,16	6 – 7	4	7
300	3,8	6 - 7	3	7

3.4.8 PPS / 40 GF – parametri in analize

Zadnji material in tudi material z največ steklenimi vlakni in višjo viskoznostjo v primerjavi z ostalimi materiali. Uporabili smo najtežje uteži in 300 °C (tabela 18).

Tabela 18: PPS / 40 GF – parametri

Temperatura (°C)	Utež (kg)	Masa vzorca (g)	Čas odreza (s)	Število odrezov
300	5	7 – 8	8	10
300	10	7 – 8	8	10
300	12,5	7 – 8	8	10
300	21,6	7 – 8	5	10

3.5 MFI analize - FTPO

Z enakimi parametri smo opravili meritve na Fakulteti za tehnologijo polimerov v laboratoriju za mehansko karakterizacijo. Tukaj imajo LIYI-MFI-LY-RP napravo za

merjenje indeksa tečenja (slika 18) taline in vlagomerom Mettler Toledo HX 204, Moisture Analyzer (slika 17). Naprava MFI na FTPO se od naprave v Polycomu razlikuje v tem, da nima avtomatskega nastavljanja uteži in je te potrebno nastaviti sam. Vlagomer na FTPO pa v primerjavi z vlagomerom v Polycomu deluje na vroči zrak, kjer ta posuši polimer in je tako pripravljen za analizo, poleg tega pa ima vgrajeno tudi tehniko na tri decimalna mesta, kjer smo morali biti pozorni na pravilno zaokroževanje mas odrezkov, pridobljenih z MFI analizo.



Slika 17: Mettler Toledo HX 204, Moisture Analyzer [17]



Slika 18: LIYI-MFI-LY-RP

Analize materialov so potekale v enakem vrstnem redu, kot smo to naredili v Polycomu. Poleg tega pa smo vse pridobljene podatke vnesli v program Excel, kjer smo izračunali povprečje meritev za vsak material in standardni odklon meritev. Povprečje meritev smo izračunali po že zelo poznani enačbi (enačba 3), enačbi povprečja.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N} \quad (3)$$

pri čemer je:

- X_n - vrednosti meritev
- N - število vseh meritev

Standardni odklon je prav tako enačba (enačba 4), velikokrat uporabljena za statistične raziskave oziroma takrat, ko želimo izvedeti, kakšno razpršenost podatkov, v našem primeru rezultatov analize, imamo [18].

$$STD = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (4)$$

pri čemer je:

- x_i - vrednost meritve i
- \bar{x} - povprečje meritev
- N - število vseh meritev

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Rezultati in diskusija – POM

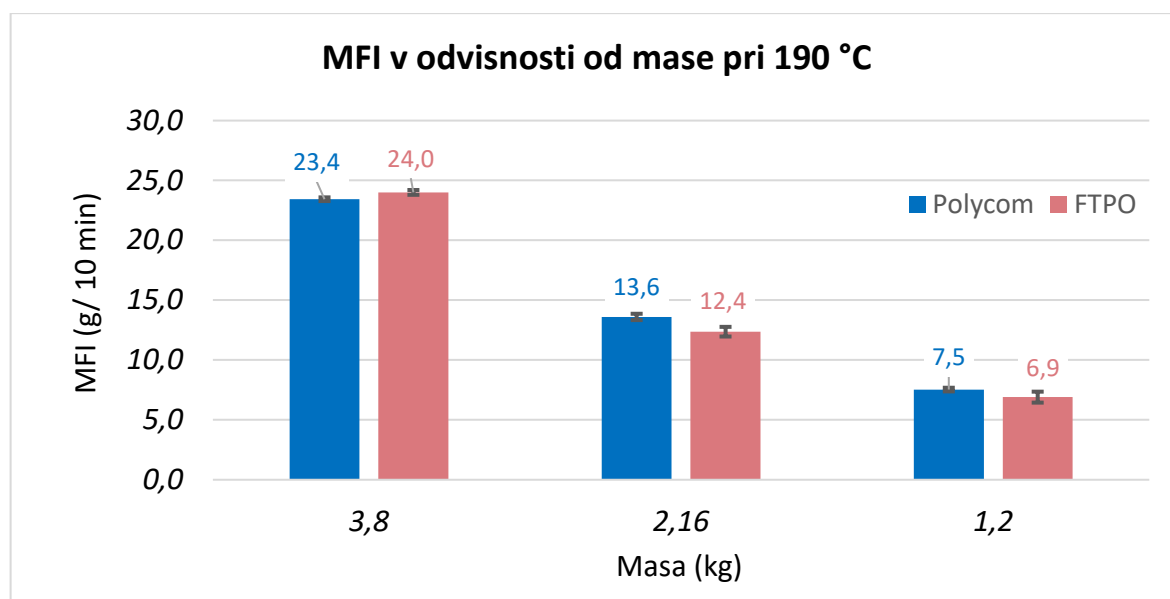
Pri analizi POM-a je bila uporabljena temperatura 190 °C. Povprečne MFI vrednosti za Polycom se vrstijo od 7,5 g/10 min (1,2 kg) do 23,4 g/10 min (3,8 kg) (tabela 19), za FTPO pa od 6,9 g/10 min (1,2 kg) do 23,9 g/10 min (3,8 kg) (tabela 20), povprečne vrednosti so podane z grafikonom (slika 19). Največja razlika med standardnima odklonoma je nastopila pri uteži 1,2 kg, in sicer za 0,31, kar daje večjo natančnost napravi v podjetju Polycom (slika 20). Pri obeh nizih meritev je razvidno, da se z naraščanjem obremenitve MFI sistematično povečuje, kar neposredno pomeni zmanjševanje viskoznosti taline. Ta trend je pri obeh napravah praktično enak, kar potrjuje, da material POM izkazuje tipično ne-newtonsko obnašanje s strižnim redčenjem. Povečana obremenitev povzroči višjo strižno hitrost v kapilari, polimerne verige se orientirajo v smeri toka, notranje trenje se zmanjša, posledično pa naraste MFI.

Tabela 19: POM – analize Polycom

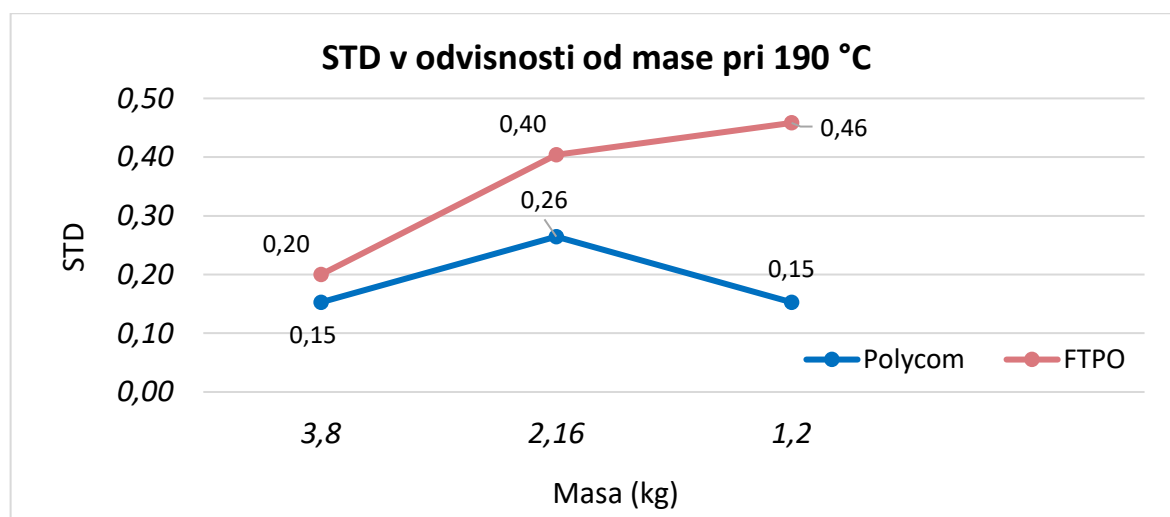
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,194	7,5
1,2	0,195	7,7
1,2	0,197	7,4
2,16	0,116	13,5
2,16	0,112	13,4
2,16	0,113	13,9
3,8	0,062	23,6
3,8	0,064	23,4
3,8	0,625	23,3

Tabela 20: POM – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,117	7,0
1,2	0,122	7,3
1,2	0,107	6,4
2,16	0,210	12,6
2,16	0,208	12,5
2,16	0,198	11,9
3,8	0,200	24,0
3,8	0,201	24,1
3,8	0,198	23,8



Slika 19: Graf MFI v odvisnosti od mase – POM



Slika 20: Graf STD v odvisnosti od mase – POM

4.2 Rezultati in diskusija – TPU

Za TPU so bile meritve izvedene pri temperaturi 200 °C in obremenitvah od 2,16 kg, 3,8 kg, 5 kg, 10 kg, 12,5 kg in 21,6 kg. Povprečne izmerjene vrednosti MFI so se gibale od 2,8 g/10 min (2,16 kg) do 17,6 g/10 min (21,6 kg) (tabela 21 in 22), povprečne vrednosti so prikazane z grafikonom (slika 21). Standardni odkloni so bili relativno nizki, kar kaže na dobro ponovljivost (slika 22). Primerjava med napravama Polycom in FTPO je pokazala minimalna odstopanja – npr. pri 21,6 kg je Polycom izmeril povprečje 17,4 g/10 min, FTPO pa 22,8 g/10 min.

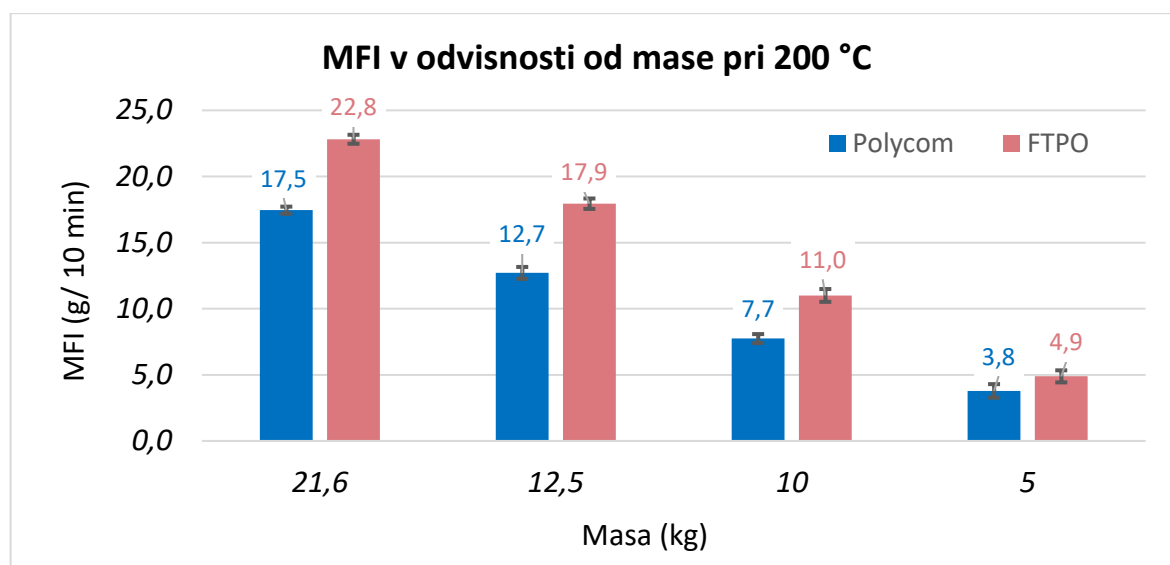
Tabela 21: TPU – analize Polycor

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,173	2,6
2,16	0,193	2,9
2,16	0,187	2,8
3,8	0,195	3,9
3,8	0,165	3,3
3,8	0,150	3,0
5	0,240	4,8
5	0,200	4,0
5	0,210	4,2
10	0,099	7,4
10	0,103	7,7
10	0,108	8,1
12,5	0,144	12,3
12,5	0,135	11,6
12,5	0,154	13,2
21,6	0,147	17,6
21,6	0,143	17,1
21,6	0,146	17,6

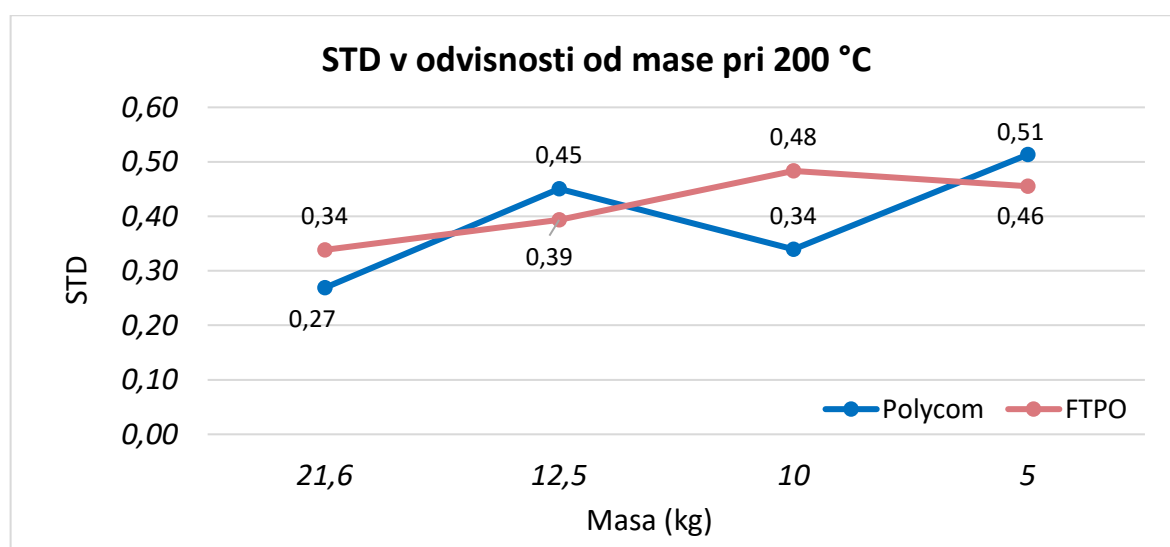
Tabela 22: TPU – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,187	2,8
2,16	0,227	3,4
2,16	0,213	3,2
3,8	0,135	2,7
3,8	0,125	2,5
3,8	0,140	2,8
5	0,225	4,5
5	0,270	5,4
5	0,235	4,7
10	0,144	10,8
10	0,155	11,6
10	0,143	10,7
12,5	0,210	18,0
12,5	0,204	17,5
12,5	0,214	18,3
21,6	0,187	22,4
21,6	0,193	23,1
21,6	0,191	22,9

POM v celotnem območju obremenitev izkazuje bistveno višje vrednosti MFI kot TPU. To pomeni, da ima POM nižjo talinsko viskoznost, bolj tekočo talino že pri nižjih strižnih hitrostih. Nasprotno ima TPU nizke vrednosti MFI pri manjših obremenitvah, izrazito viskozno in viskoelastično talino, kar je neposredna posledica njegove elastomerne narave in močnih intermolekulskih interakcij med trdimi segmenti.



Slika 21: Graf MFI v odvisnosti od mase – TPU



Slika 22: Graf STD v odvisnosti od mase – TPU

4.3 Rezultati in diskusija – PP-H

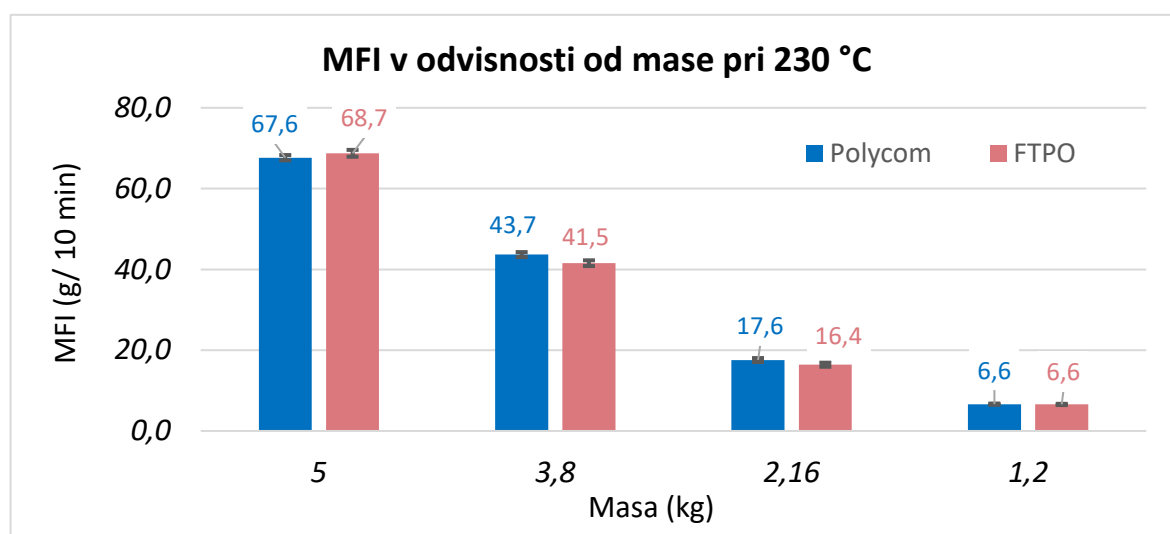
Meritve so bile opravljene pri temperaturi 230 °C. Povprečne vrednosti MFI za Polycom so bile od 6,6 g/10 min (1,2 kg) do 67,6 g/10 min (5 kg) (tabela 23), med tem ko se za FTPO meritve ne razlikujejo dovolj, saj je bilo pomerjeno prav tako od 6,6 g/10 min do 68,7 g/10 min (tabela 24). Povprečne vrednosti so prikazane z grafikonom (slika 23). Krivulji standardnih odklonov med napravama tukaj sovpadata in sta primerljivi (slika 24). Naraščanje obremenitve je povzročilo približno 10-kratno povečanje MFI. Temu sledi ugotovitev, da je PP-H pokazal največjo sorazmerno spremembo med najnižjo in najvišjo obremenitvijo, kar potrjuje njegovo nizko viskoznost in visoko občutljivost na spremembe strižnih sil.

Tabela 23: PP-H – Polycom

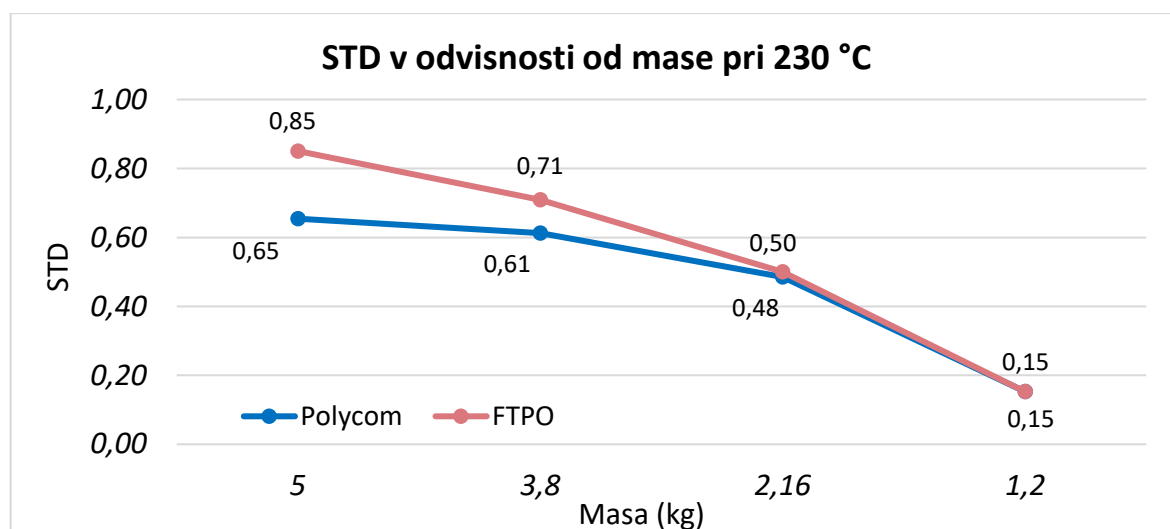
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,055	6,6
1,2	0,046	5,5
1,2	0,057	6,8
2,16	0,142	17,0
2,16	0,150	18,0
2,16	0,147	17,6
3,8	0,366	43,9
3,8	0,358	43,0
3,8	0,368	44,1
5	0,566	67,9
5	0,558	66,9
5	0,568	68,1

Tabela 24: PP-H – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,055	6,6
1,2	0,560	6,7
1,2	0,053	6,4
2,16	0,141	16,9
2,16	0,137	16,4
2,16	0,133	15,9
3,8	0,345	41,4
3,8	0,353	42,3
3,8	0,341	40,9
5	0,566	67,9
5	0,580	69,6
5	0,573	68,7



Slika 23: Graf MFI v odvisnosti od mase – PP-H



Slika 24: Graf STD v odvisnosti od mase – PP-H

4.4 Rezultati in diskusija – PA6 / 20 GF

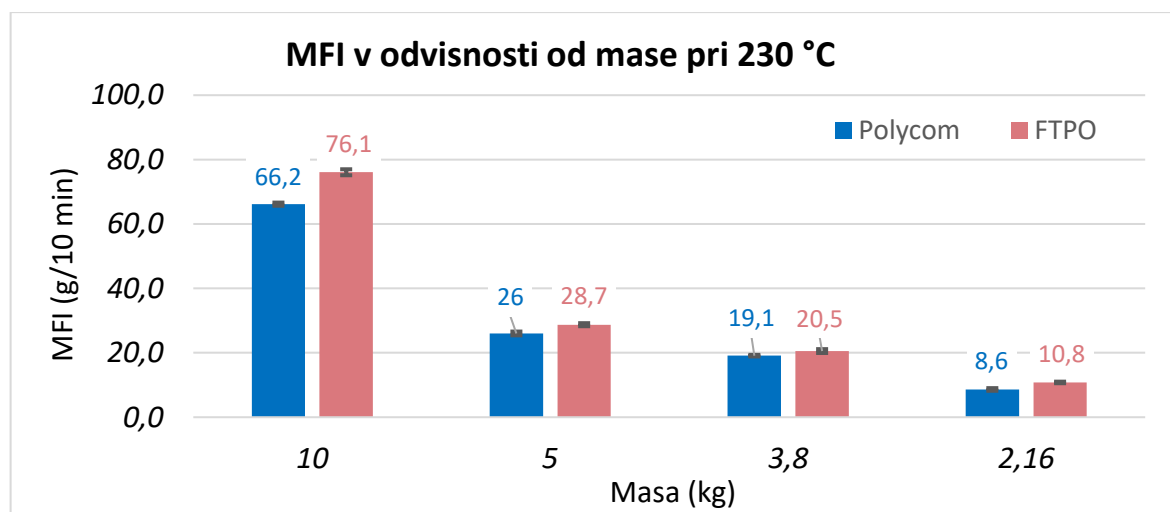
Meritve so bile opravljene pri temperaturi 230 °C. Povprečne vrednosti MFI za Polycom so bile od 8,6 g/10 min (2,16 kg) do 66,2 g/10 min (10 kg) meritve v tabeli 25, med tem ko so za FTPO meritve od 10,8 g/10 min do 76,1 g/10 min (tabela 26), povprečje skupnih MFI rezultatov pa je prikazano z grafikonom (slika 25). Krivulji standardnih odklonov med napravama tukaj ne sovpadata, je pa razvidno, da padata glede na manjšanje mase uteži (slika 26).

Tabela 25: PA6 / 20 GF – analize Polycom

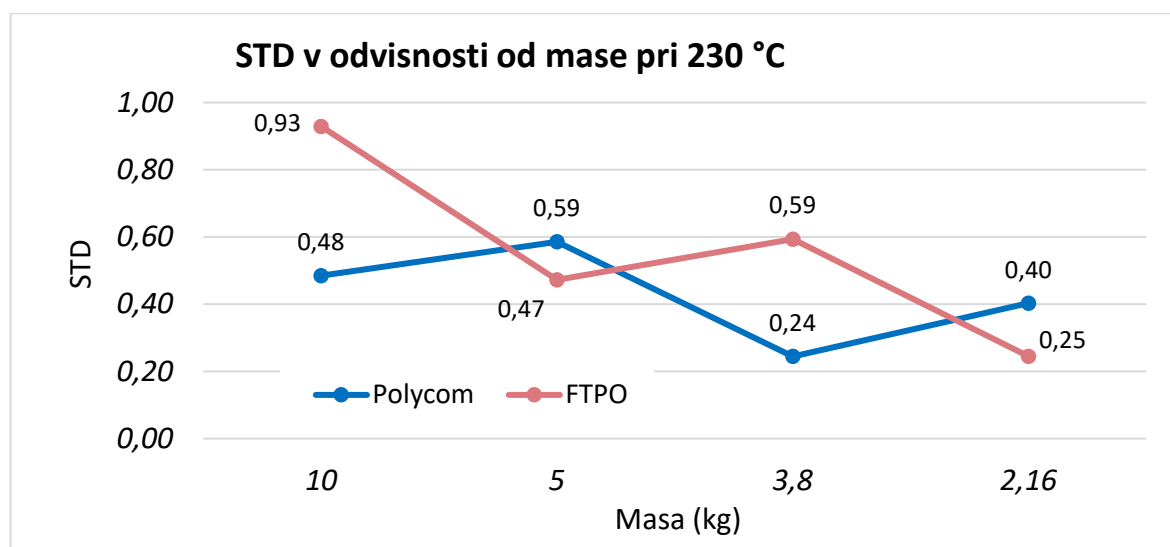
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,099	8,5
2,16	0,106	9,1
2,16	0,097	8,3
3,8	0,157	18,8
3,8	0,161	19,3
3,8	0,160	19,2
5	0,213	25,5
5	0,222	26,6
5	0,216	25,9
10	0,549	65,9
10	0,548	65,8
10	0,556	66,7

Tabela 26: PA6 / 20 GF – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,126	10,8
2,16	0,124	10,6
2,16	0,137	11,7
3,8	0,170	20,4
3,8	0,167	20,0
3,8	0,177	21,2
5	0,253	29,1
5	0,241	28,9
5	0,235	28,2
10	0,632	75,8
10	0,643	77,1
10	0,628	75,3



Slika 25: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 20 GF



Slika 26: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 20 GF

4.5 Rezultati in diskusija – PA6 / 30 GF in reciklati

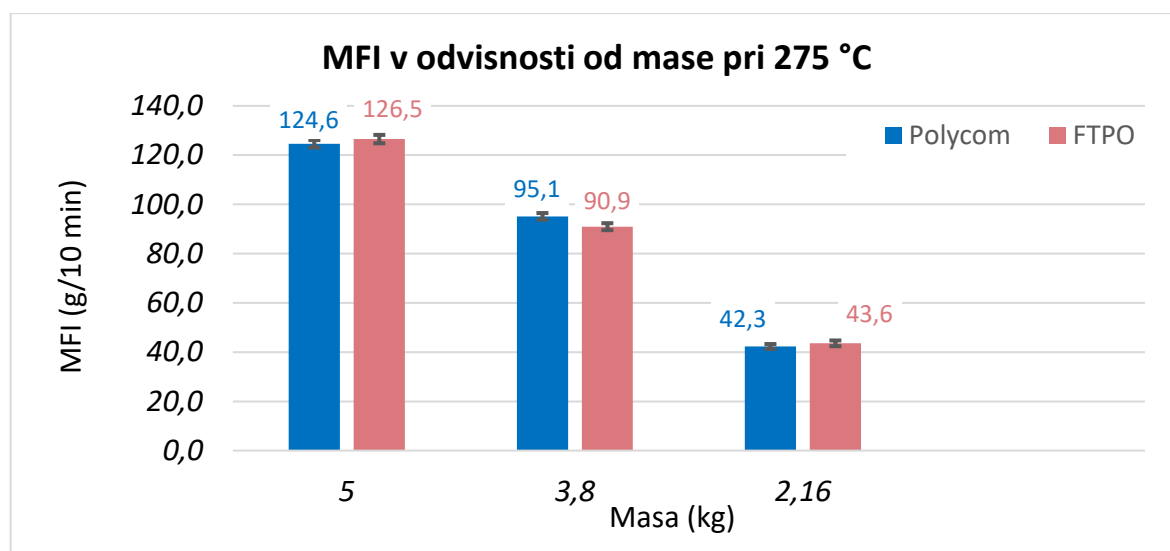
Meritve so bile izvedene pri 275 °C in treh masah utežeh (2,16 kg, 3,8 kg in 5 kg). Pri osnovnem materialu so meritve dosegale do 124 g/10 min podobno na FTPO, med tem ko so se vrednosti z večjim deležem recyklata, 10 %, 30 % in 50 %, sorazmerno višale podatki razvidni v tabelah 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 in 34. Vse meritve so povzete v primerjalnih grafikonih (slike 27, 29, 31 in 33). Podatki za standardni odklon so izenačeni pri osnovnem materialu (slika 28), pri ostalih treh z deleži recyklata niha tudi odklon (slike 30, 32 in 34). Ugotovitev povzema, da dodajanje recyklata povečuje pretočnost (MFI), kar je povezano z znižanjem povprečne molekulske mase in degradacijo verig. Največje povečanje je bilo opaženo pri 10 % recyklata pri manjših utežeh, kar kaže na izrazit vpliv recyklata na talilne lastnosti. Temu se je potrebno ravnati v procesih brizganja in nižati temperature brizgalnih procesov. Pri sami analizi se nam je pojavljala težava predolgih odrezkov, saj je material že v osnovi tekoč in ima visok MFI.

Tabela 27: PA6 / 30 GF – analize Polycom

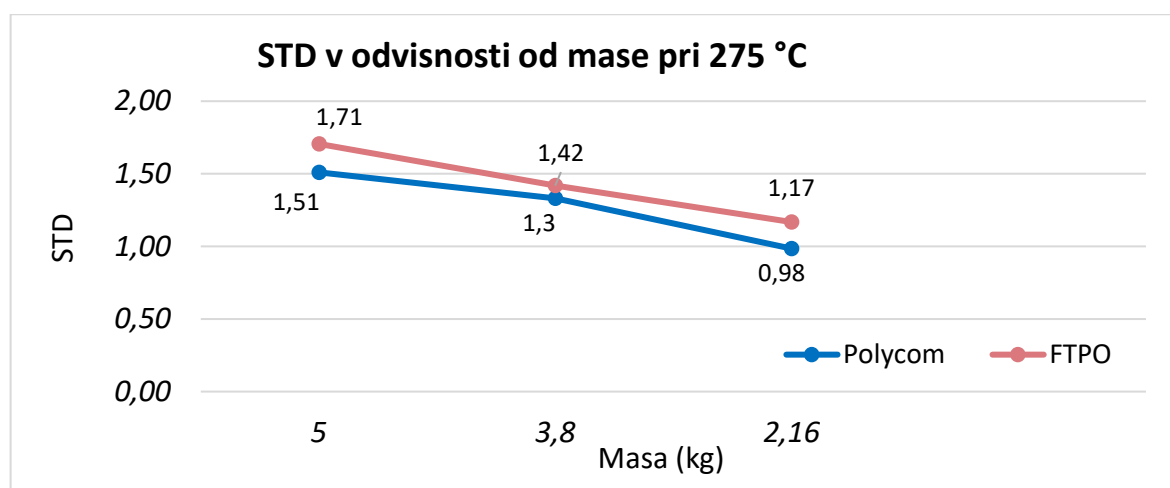
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,362	43,4
2,16	0,346	41,5
2,16	0,350	42,0
3,8	0,790	94,8
3,8	0,805	96,6
3,8	0,783	94,0
5	1,025	123,0
5	1,040	124,8
5	1,050	126,0

Tabela 28: PA6 / 30 GF – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,365	43,8
2,16	0,380	45,6
2,16	0,353	42,3
3,8	0,745	89,4
3,8	0,760	91,2
3,8	0,168	92,2
5	1,050	126,0
5	1,070	128,4
5	1,043	125,1



Slika 27: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF



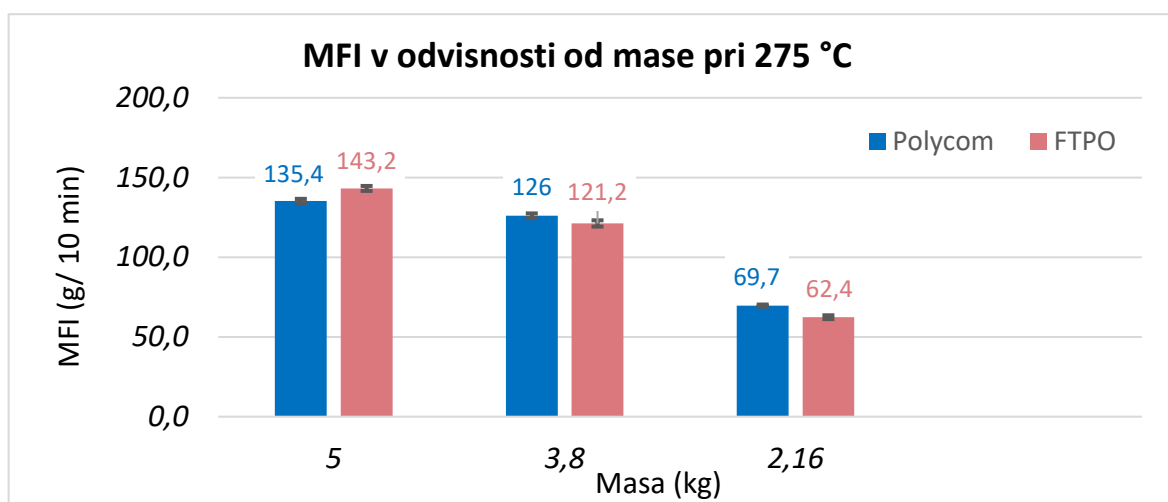
Slika 28: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF

Tabela 29: PA6 / 30 GF + 10r – analize Polycom

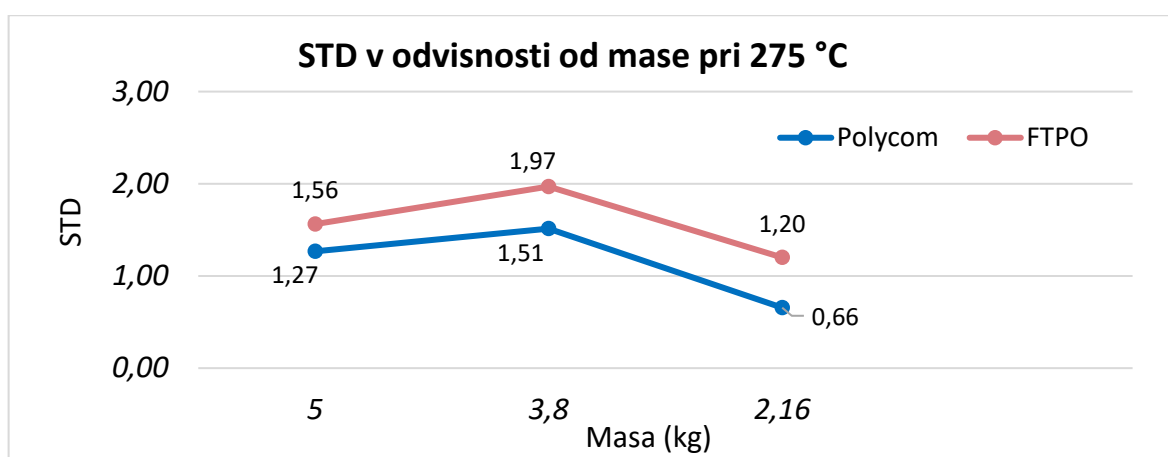
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,362	69,8
2,16	0,346	69,0
2,16	0,350	70,3
3,8	0,790	127,2
3,8	0,805	126,5
3,8	0,783	124,3
5	1,025	136,8
5	1,040	134,4
5	1,050	134,9

Tabela 30: PA6 / 30 GF + 10 % reciklata – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,520	62,4
2,16	0,530	63,6
2,16	0,510	61,2
3,8	1,005	120,6
3,8	1,028	123,4
3,8	0,997	119,6
5	1,179	141,5
5	1,205	144,6
5	1,195	143,4



Slika 29: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 10 % reciklat



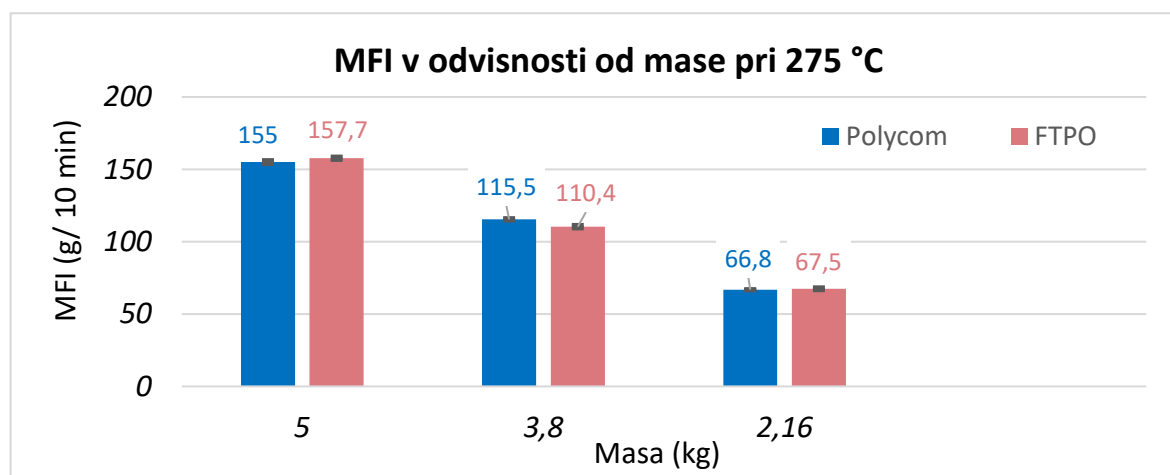
Slika 30: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 10 % reciklata

Tabela 31: PA6 / 30 GF + 30r – analize Polycor

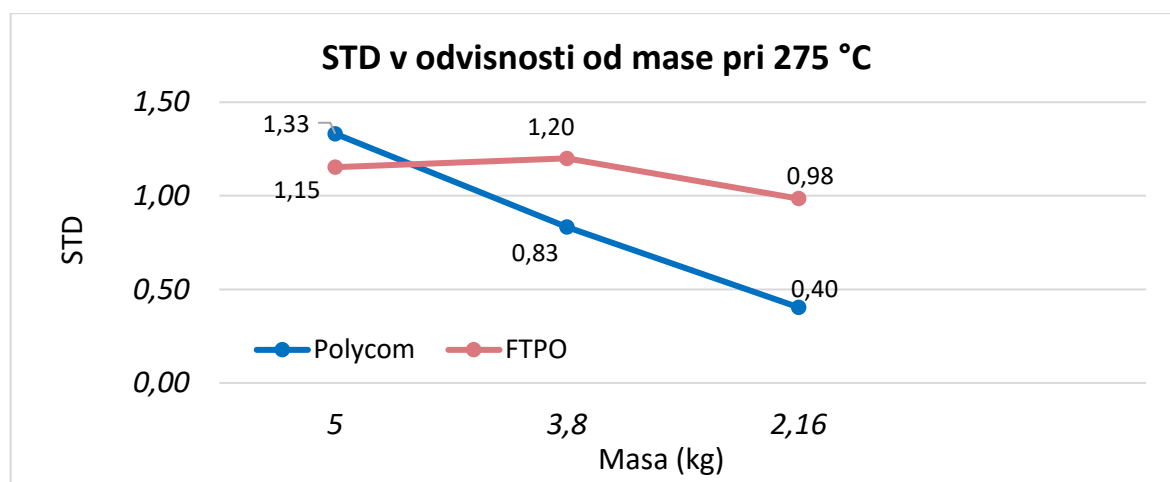
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	1,295	66,4
2,16	1,280	67,2
2,16	1,302	66,9
3,8	0,940	112,8
3,8	0,970	116,4
3,8	0,960	115,2
5	0,558	153,6
5	0,560	156,2
5	0,533	155,4

Tabela 32: PA6 / 30 GF + 30 %reciklata – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,565	67,8
2,16	0,569	68,3
2,16	0,553	66,4
3,8	0,920	110,4
3,8	0,930	111,6
3,8	0,910	109,2
5	1,325	159,0
5	1,311	157,3
5	1,307	156,8



Slika 31: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 30 % reciklat



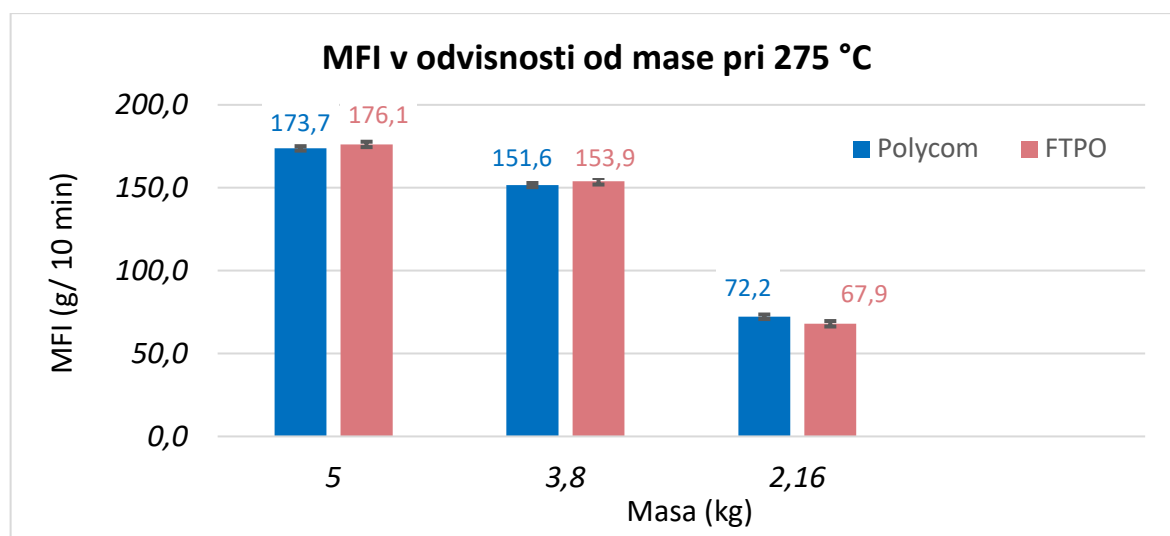
Slika 32: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 30 % reciklat

Tabela 33: PA6 / 30 GF + 50r – analize Polycom

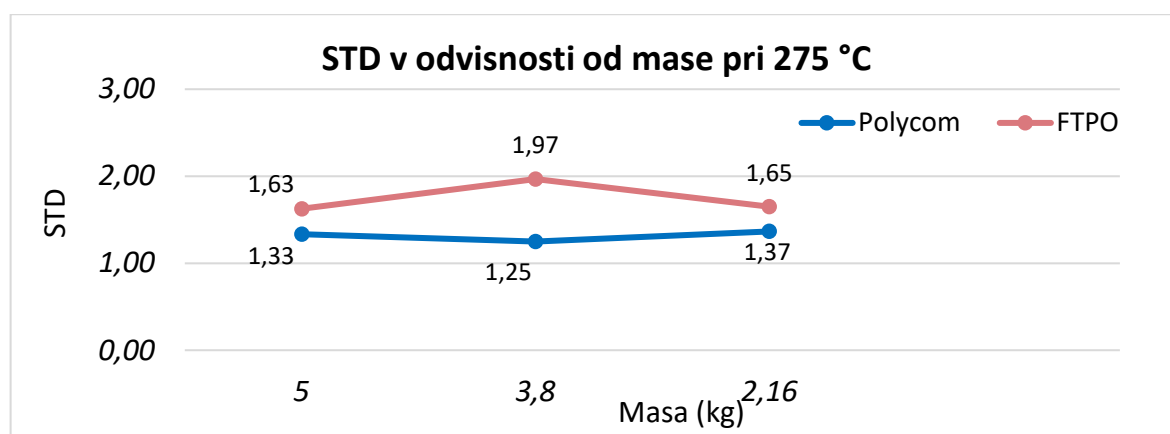
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,607	72,8
2,16	0,609	73,1
2,16	0,588	70,6
3,8	1,278	153,4
3,8	1,255	150,6
3,8	1,26	151,2
5	1,445	173,4
5	1,438	172,6
5	1,463	175,2

Tabela 34: PA6 / 30 GF + 50 % reciklata – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
2,16	0,570	68,4
2,16	0,578	69,3
2,16	0,551	66,1
3,8	1,285	154,2
3,8	1,265	151,8
3,8	1,298	155,7
5	1,483	177,9
5	1,465	175,8
5	1,456	174,7



Slika 33: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 50 % reciklat



Slika 34: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 50 % reciklat

Dodajanje steklenih vlaken (20 – 30 %) poveča togost, hkrati pa zaradi razpršitve vlaken MFI nekoliko naraste pri višjih obremenitvah. Reciklat povečuje tekočnost taline (višji MFI), kar je posledica delne degradacije ali nižje molekulske mase recikliranega materiala. Vsi PA6 materiali izkazujejo klasično strižno redčenje, kar pomeni, da se talina pri višjih obremenitvah zelo utekočini.

4.6 Rezultati in diskusija – PC / GF

Pri analizi materiala PC / GF smo uporabili 2,16, 3,8 in 5 kg uteži ter temperaturo 300°C. Meritve med napravama so primerljive (tabela 35 in 36), te so grafično prikazane z sliko 35, prav tako standardni odkloni (slika 36). Težave so se pojavljale pri zatikanju rezala v šobo, saj je bila ta potisnjena s cilindra, temu smo morali nastavljeni rezilo, k temu pa je vodila visoka temperatura, 300 °C. PC/GF ima pri nizkih obremenitvah višji MFI kot PA6 / 20 GF (12 g/10 min proti 8–10 g/10 min). Pri višjih obremenitvah je MFI PC/GF približno enak ali nekoliko višji kot PA6 / 20 GF, vendar manjši kot PA6 / 30 GF z reciklatom (51–55 g/10 min proti 124–177 g/10 min). To

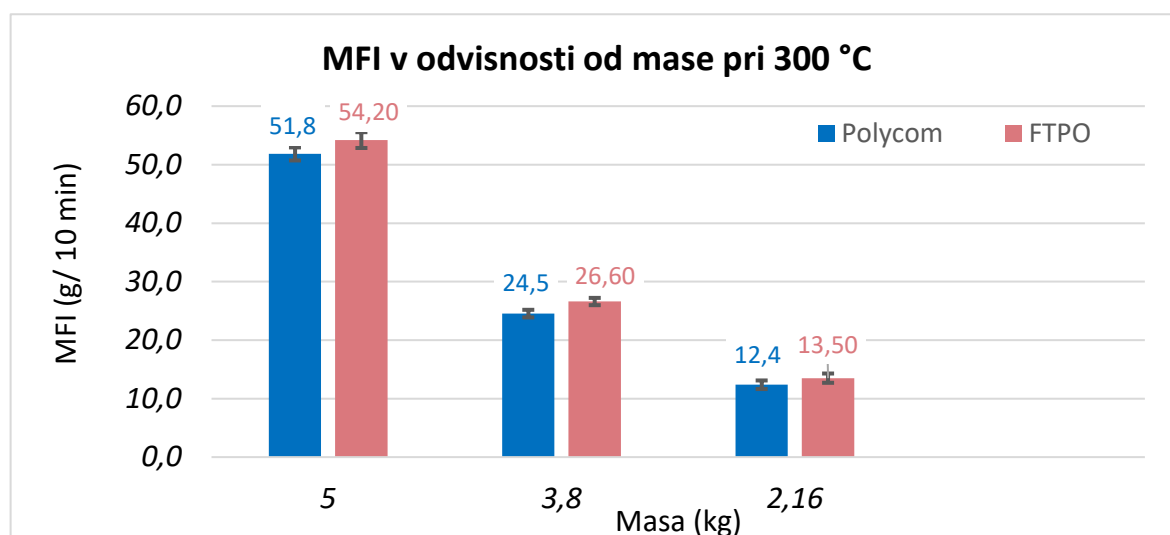
pomeni, da je PC/GF tudi pri visoki obremenitvi manj tekoč od močno vlaknatega ali recikliranega PA6, kar je posledica visoke molekulske mase polikarbonata in močnih intermolekulskih interakcij.

Tabela 35: PC / GF – analize Polycom

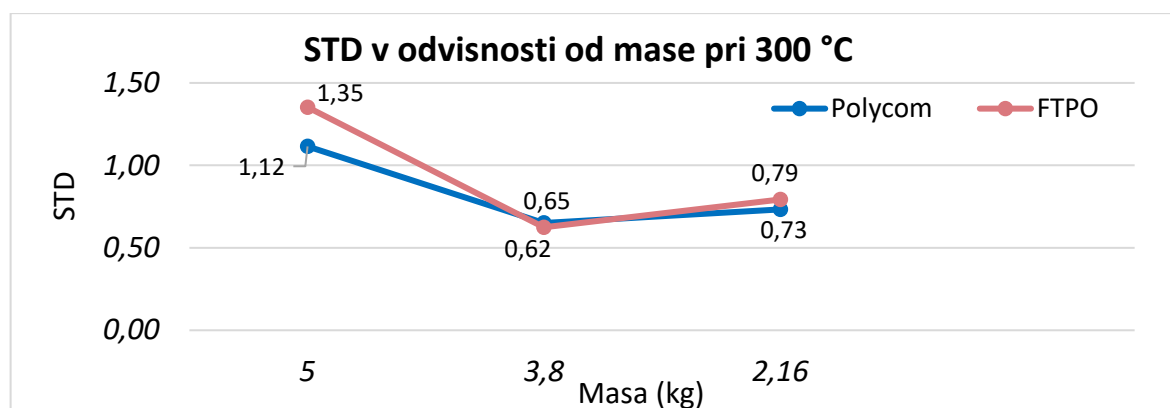
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,101	12,1
1,2	0,110	13,2
1,2	0,098	11,8
2,16	0,159	23,9
2,16	0,163	24,5
2,16	0,168	25,2
3,8	0,266	53,1
3,8	0,255	51,0
3,8	0,256	51,1

Tabela 36: PC / GF – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
1,2	0,118	14,1
1,2	0,105	12,6
1,2	0,112	13,8
2,16	0,182	27,3
2,16	0,176	26,4
2,16	0,177	26,6
3,8	0,463	55,5
3,8	0,440	52,8
3,8	0,453	54,3



Slika 35: Graf MFI v odvisnosti od mase – PC / GF



Slika 36: Graf STD v odvisnosti od mase – PC / GF

4.7 Rezultati in diskusija – PPS / 40 GF

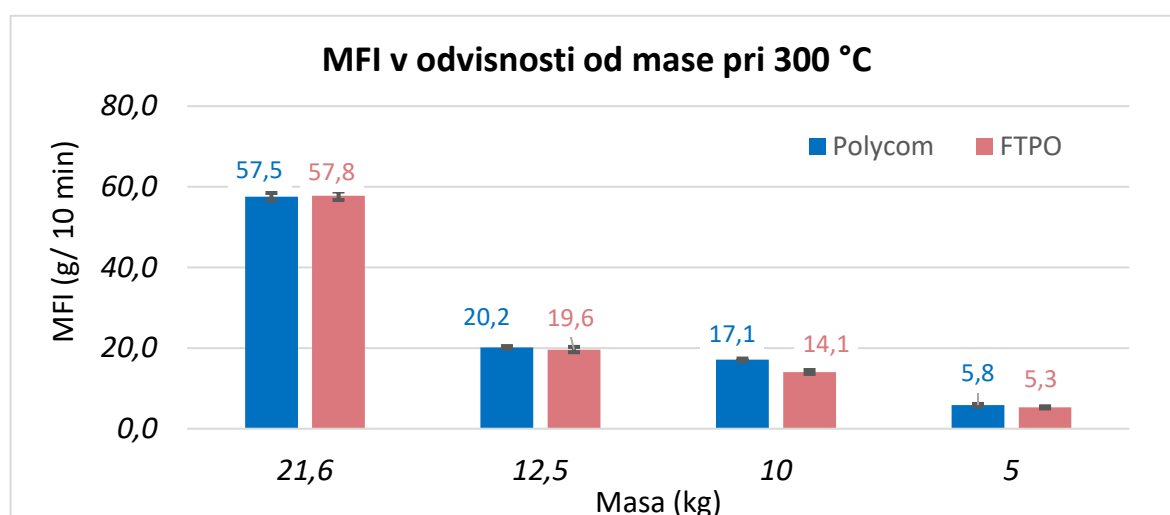
Material PPS / 40 GF ima višjo viskoznost v primerjavi z ostalimi materiali, ki prav tako vsebujejo steklena vlakna. Pridobljene meritve so v primerjavi med napravama skoraj da brez razlik (tabeli 37 in 38), te so grafično prikazane z grafikonom (slika 37). Standardni odkloni pokažejo nekoliko večje razlike, pa vendar sovpadata (slika 38). Težave so se prav tako pojavile pri odrezovanju, saj je rezalo zadevalo ob šobo, še posebej pri uporabi uteži 21,6 kg. PPS / 40 GF je najbolj viskozni material pri nizkih obremenitvah, kar odraža njegovo visoko zmogljivost in togost. Pri visokih obremenitvah postane procesabilen, vendar še vedno manj tekoč kot reciklirani ali močno vlaknati PA6 ter PP-H. Zaradi visoke vsebnosti vlaken je povzročena večja strižna napetost, to vodi do nizkega MFI-ja.

Tabela 37: PPS / 40 GF – analize Polycom

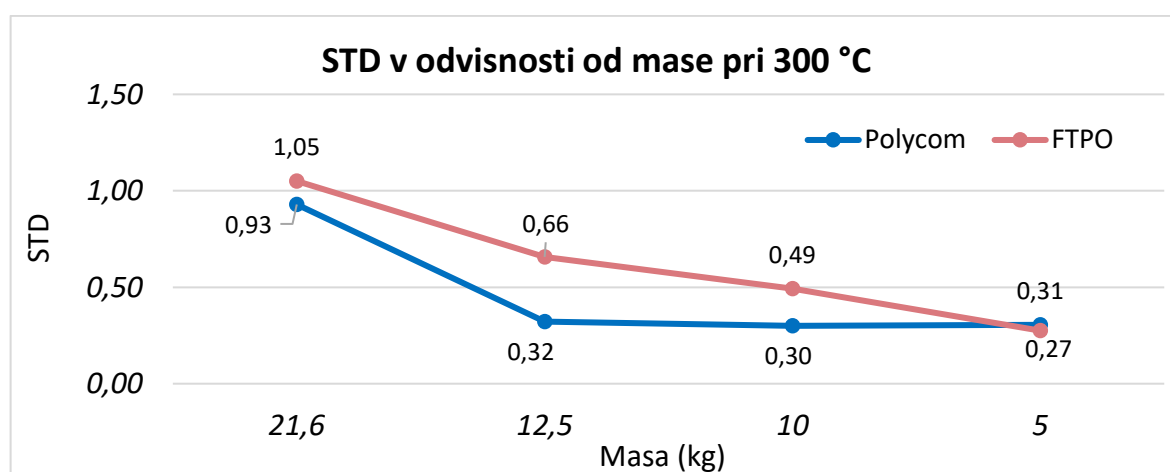
Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
5	0,079	5,9
5	0,081	6,1
5	0,073	5,5
10	0,228	17,1
10	0,232	17,4
10	0,224	16,8
12,5	0,264	19,8
12,5	0,272	20,4
12,5	0,271	20,3
21,6	0,474	56,9
21,6	0,476	57,1
21,6	0,488	58,6

Tabela 38: PPS / 40GF – analize FTPO

Utež (kg)	Masa odrezka (g)	MFI (g/ 10 min)
5	0,071	5,3
5	0,073	5,5
5	0,062	4,9
10	0,192	14,4
10	0,180	13,5
10	0,191	14,3
12,5	0,264	19,8
12,5	0,269	20,2
12,5	0,252	18,9
21,6	0,473	56,7
21,6	0,482	57,8
21,6	0,490	58,8



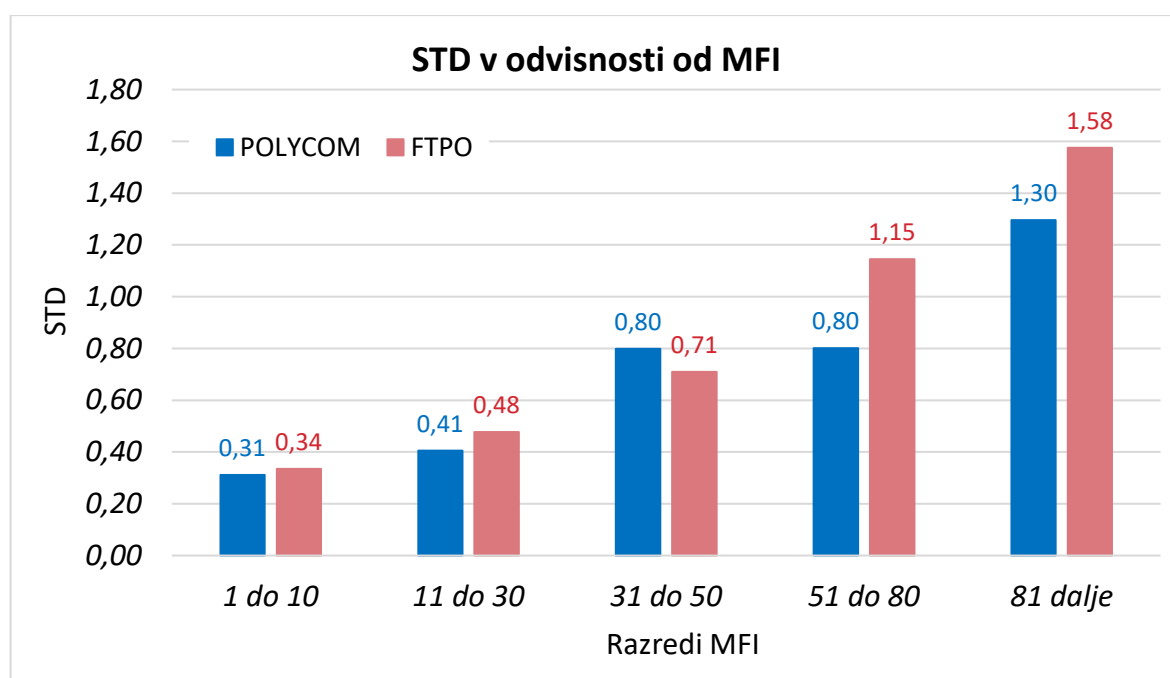
Slika 37: Graf MFI v odvisnosti od mase – PPS / 40 GF



Slika 38: Graf STD v odvisnosti od mase – PPS / 40 GF

4.8 Primerjava standardnih odklonov med napravama

Po narejenih vseh meritvah in izračunih standardnih odklonov smo se tako odločili za grafični prikaz le teh (slika 39), in sicer v različnih intervalih dobljenega MFI lahko razberemo, kako se standardni odklon sorazmerno večja s povečanim MFI-jom. Pri večini meritev je standardni odklon z meritvami Polycom nekoliko nižja v primerjavi s FTPO, izjema je v intervalu od 31 do 50 vrednosti MFI-ja. To nam pove, da je naprava v podjetju Polycom natančnejša in primernejša. To je razvidno že s samega stališča uporabe, saj nanašanje uteži na in z naprave pri toliko meritvah, zajema nekoliko več časa, kar pa z napravo Automatic MFR MVR Plastic Melt Flow Index Tester, optimiramo. Prav tako se zgodi nanos nepravilnih uteži in so s tem meritve napačne, za kar je potrebno le te ponoviti. Tega se pri napravi v Polycomu ne spregleda, saj so uteži nameščene v zaporedju, ki jih nastavljamo avtomatsko.



Slika 39: Graf STD v odvisnosti od MFI

5 SKLEP

V okviru diplomskega dela je bila v podjetju Polycom d.o.o. uspešno vzpostavljena naprava za določanje indeksa tečenja taline (MFI), narejena navodila za uporabo in določene ustrezne metode za izvajanje analiz različnih polimernih materialov. S tem je podjetju omogočeno samostojno izvajanje rutinskih meritev, ki so ključne za vhodno kontrolo kakovosti in stabilnost proizvodnje. Izvedene meritve na desetih različnih materialih so potrdile pravilno delovanje naprave ter ustreznost izbranih parametrov, določenih v skladu s standardom ISO 1133.

Primerjava rezultatov med napravo v podjetju Polycom in napravo na Fakulteti za tehnologijo polimerov je pokazala dobro ujemanje vrednosti MFI, kar potrjuje ponovljivost in zanesljivost merilne metode. Ugotovljene razlike med posameznimi meritvami so bile v mejah pričakovanega standardnega odklona. Največja odstopanja so se pojavila pri materialih z višjo vsebnostjo steklenih vlaken in recyklata, kjer že manjše razlike v pogojih meritev vplivajo na pretočnost polimerne taline. Poseben poudarek je bil namenjen vplivu deleža recyklata v materialu PA6/30 GF. Rezultati so pokazali, da se z naraščajočim deležem recikliranega materiala vrednosti MFI povečujejo, kar nakazuje zmanjšanje viskoznosti zaradi krajšanja polimernih verig. Pri 10 % deležu recyklata je bilo zaznано rahlo povečanje pretočnosti, medtem ko so pri 30 % in 50 % deležu spremembe izrazitejše. Ti rezultati potrjujejo pričakovano degradacijo materiala pri večji vsebnosti recyklata in poudarjajo potrebo po nadzoru deleža sekundarnih surovin pri industrijski uporabi. Pred samimi analizami, smo predvidevali, da se bo pretočnost materiala višala z višjo maso uteži, kar pa smo tokom dela tudi potrdili. Posledica višjih mas uteži pa ni le višji MFI, temveč tudi višja strižna hitrost, saj nakazuje na strig med molekulami polimera in morebitnimi vlakni ter polnili. Ta se pri brizganju pri višjih obremenitvah še bolj izraža in v veliko primerih dodatno pregreva material. Primerjava standardnih odklonov med obema napravama je pokazala, da naprava v podjetju Polycom dosega nižji odklon rezultatov, kar pomeni boljšo ponovljivost meritev. Ključna prednost te naprave je avtomatsko spuščanje uteži, ki zagotavlja enakomerno in ponovljivo obremenitev taline med merjenjem. Na FTPO naprava uteži spušča ročno, kar lahko povzroči manjša odstopanja med posameznimi ponovitvami. Kljub tem razlikam so bila odstopanja med napravama znotraj pričakovane merilne negotovosti.

Rezultati diplomskega dela potrjujejo, da je bila vzpostavitev MFI naprave v podjetju Polycom uspešna in da so razvite metode meritev skladne s standardnimi postopki. Delo pomembno prispeva k izboljšanju kakovostnega nadzora v podjetju, saj omogoča sprotno preverjanje vhodnih materialov in spremljanje vpliva recyklata na procesne lastnosti. Pridobljeno znanje predstavlja osnovo za nadaljnji razvoj analiznih metod, širitev testnih zmogljivosti in uvedbo dodatnih merilnih parametrov, kot sta volumski pretok taline in viskoznost v širšem temperaturnem območju.

Za nadaljnje delo se predlaga razširitev analiz na druge materiale, vključitev večjega števila ponovitev meritev ter izvedba statistične obdelave rezultatov z analizo

ponovljivosti (R&R – run and rate analiza). Prav tako bi bilo smiselno vzpostaviti sistem sledljivosti meritev in interno validacijo postopka, s čimer bi podjetje pridobilo popolno zanesljivost pri ocenjevanju kakovosti vhodnih polimernih materialov.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] A.Y. Malkin, A. Isayev, Rheology. Concepts, Methods, and Applications: Concepts, Methods, and Applications: 3rd Edition, Rheology. Concepts, Methods, and Applications: Concepts, Methods, and Applications: 3rd Edition (2017) 1–185. <https://books.google.com/books/about/Rheology.html?hl=sl&id=66ARDQAAQB-AJ> (accessed September 11, 2025).
- [2] Kobis, Rotacijski viskozimetri, (2025). <https://www.kobis.si/index.php/prodajni-program/karakterizacija-materialov/viskozimetrija/82-rotacijski-viskozimetri> (accessed October 2, 2025).
- [3] Y.Y. Hou, H.O. Kassim, Instrument techniques for rheometry, Review of Scientific Instruments 76 (2005) 1–19. <https://doi.org/10.1063/1.2085048>.
- [4] M. Rides, C. Allen, NPL REPORT MAT 3 The use of the melt flow rate method for moisture sensitive materials and an evaluation of the uncertainties in melt flow rate measurement, 2007. www.npl.co.uk.
- [5] A. V. Shenoy, D. R. Saini, Melt Flow Index: More Than Just A Quality Control Rheological Parameter. Part I , Advances in Polymer Technology, Vol6, No. 1 (1986) 1–58. <https://doi.org/10.1002/adv.1986.060060101>.
- [6] F. Doronin, A. Rudakova, G. Rytikov, V. Nazarov, Simple Determination of the Melt Flow Index of Composite Polymer Filaments Used in Material Extrusion Additive Manufacturing, Coatings 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/coatings13091592>.
- [7] G. Wang, L. Li, P. Yang, J. Chen, Glass fiber reinforced nylon-6/nylon-1012 composite material serves as automotive rearview mirror bracket, Next Materials 8 (2025) 100–666. <https://doi.org/10.1016/J.NXMATE.2025.100666>.
- [8] Ibrahim Alhaj, Saha Trikes, Firat Hacıoglu, Umit Tayfun, AML_Volume 11_Issue 4_Pages 1-7, (2020). <https://doi.org/10.5185/amlett.2020.041501>.
- [9] L. Yu, Q. Hu, T. Li, J. Zhang, S. Chen, Z. Xu, S. Chen, D. Zhang, Ultrahigh Flowability and Excellent Mechanical Performance of Glass Fiber/PA6 Composites Prepared by Hyperbranched Polymers, Macromol Mater Eng 308 (2023). <https://doi.org/10.1002/mame.202300012>.
- [10] R. Dewi, N. Sylvia, Zulnazri, M. Riza, Melt flow Index (MFI) analysis of sago based thermoplastic starch blend with polypropylene and polyethylene, Mater Today Proc 87 (2023) 396–400. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.173>.
- [11] N.N. Aisa, R. Setiawan, D. Wicaksono, E. Dimas, The effect of recycling frequency on the melt flow rate of polypropylene materials, in: 2024: p. 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0192646>.
- [12] L.B. Dollischek, P. Frohn-Sörensen, F. Kurz, B. Engel, Injection molding of post-industrial recycled glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPS GF40):

- industrial feasibility and material analysis, *J Clean Prod* 471 (2024) 143–416. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.143416>.
- [13] Pacorr, The Benefits of Melt Flow Index Testing for Plastic Manufacturers, (2024). <https://www.pacorr.com/blog/melt-flow-index-testing-for-plastic-manufacturers/> (accessed September 14, 2025).
- [14] Liyi-tech, MFR Melt Flow Index Tester / Melt Flow Index Machine For Polypropylene, (2025). <https://www.liyi-tech.com/sale-8553159-mfr-melt-flow-index-tester-melt-flow-index-machine-for-polypropylene.html> (accessed September 15, 2025).
- [15] Upwell, Automatic MFR MVR Plastic Melt Flow Index Tester – Jinan Upwell Test Co.,Ltd, (2025). <https://www.upwelltest.com/product/iso-1133-astm-d-1238-astm-d-3364-automatic-mfr-mvr-plastic-melt-flow-index-tester/automatic-mfr-mvr-plastic-melt-flow-index-tester-2/> (accessed October 2, 2025).
- [16] Labtech engineering, TWIN SCREW EXTRUDER 26 MM – Labtech Engineering Co. Ltd., (2025). <https://labtechengineering.com/group/twin-screw-extruder-26-mm/> (accessed October 5, 2025).
- [17] Mettler Toledo, Mettler Toledo Moisture Analyzer Methods at Mildred Urban blog, (2025). https://www.mt.com/si/sl/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/moisture-analyzers/moisture-analyzer/HX204.html (accessed October 9, 2025).
- [18] RT, Standardni odklon (σ) | Statistika - RT, (2025). https://www.rapidtables.org/sl/math/probability/standard_deviation.html (accessed October 11, 2025).

SEZNAM SLIK

Slika 1: Reologija kot interdisciplinarna znanost [1].....	3
Slika 2: Shema rotacijskega viskozimetra [1]	4
Slika 3: Sodobni rotacijski viskozimeter [2].....	5
Slika 4: Shema preproste MFI naprave [5]	6
Slika 5: Graf MFI v odvisnosti od dodatka mice in steklenih vlaken [8]	8
Slika 6: Polavtomatski tester pretoka taline [13]	14
Slika 7: Automatic MFR MVR Plastic Melt Flow Index Tester [15]	15
Slika 8: Pripravljena mešanica PA6/ 30 GF + reciklat	17
Slika 9: 26 Compaunder	17
Slika 10: Lijak kompavnderja.....	18
Slika 11: Šoba kompavnderja (levo) in vodna kopel (desno).....	18
Slika 12: Paletirnik.....	19
Slika 13: Mobilni sušilnik	19
Slika 14: Postavljena MFI naprava	20
Slika 15: Vlagomer Polycom.....	21
Slika 16: Kalcijev hidrat	21
Slika 17: Mettler Toledo HX 204, Moisture Analyzer [17]	25
Slika 18: LIYI-MFI-LY-RP	25
Slika 19: Graf MFI v odvisnosti od mase – POM.....	28
Slika 20: Graf STD v odvisnosti od mase – POM	28
Slika 21: Graf MFI v odvisnosti od mase – TPU	30
Slika 22: Graf STD v odvisnosti od mase – TPU	30
Slika 23: Graf MFI v odvisnosti od mase – PP-H.....	31
Slika 24: Graf STD v odvisnosti od mase – PP-H.....	32
Slika 25: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 20 GF	33
Slika 26: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 20 GF	33
Slika 27: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF	35
Slika 28: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF	35
Slika 29: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 10 % reciklat	36
Slika 30: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 10 % reciklata	36
Slika 31: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 30 % reciklat	37
Slika 32: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 30 % reciklat	38
Slika 33: Graf MFI v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 50 % reciklat	39
Slika 34: Graf STD v odvisnosti od mase – PA6 / 30 GF + 50 % reciklat	39
Slika 35: Graf MFI v odvisnosti od mase – PC / GF	40
Slika 36: Graf STD v odvisnosti od mase – PC / GF	41
Slika 37: Graf MFI v odvisnosti od mase – PPS / 40 GF	42
Slika 38: Graf STD v odvisnosti od mase – PPS / 40 GF	42
Slika 39: Graf STD v odvisnosti od MFI.....	43
Slika 40: Navodila za uporabo MFI str. 1	53
Slika 41: Navodila za uporabo MFI str. 2.....	54
Slika 42: Navodila za uporabo MFI str. 3.....	55

Slika 43: Navodila za uporabo MFI str. 4.....	56
Slika 44: Navodila za uporabo MFI str. 5.....	57
Slika 45: Navodila za uporabo MFI str. 6.....	58
Slika 46: Navodila za uporabo MFI str. 7.....	59
Slika 47: Navodila za uporabo MFI str. 8.....	60
Slika 48: Navodila za uporabo MFI str. 9.....	61
Slika 49: Navodila za uporabo MFI str. 10.....	62
Slika 50: navodila za uporabo MFI str. 11.....	63
Slika 51: Navodila za uporabo MFI str. 12.....	64
Slika 52: Navodila za uporabo MFI str. 13.....	65
Slika 53: Navodila za uporabo MFI str. 14.....	65
Slika 54: Navodila za uporabo MFI str. 15.....	66
Slika 55: Navodila za uporabo MFI str. 16.....	66

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Vpliv polnil na MFI PA6 [9]	10
Tabela 2: Vpliv dodatkov na MFI termoplastičnega škroba [10]	11
Tabela 3: Vpliv recikliranja na MFI polipropilena [11]	11
Tabela 4: Vpliv reciklata na PPS [12]	12
Tabela 5: Seznam materialov	16
Tabela 6: Priprava vzorcev PA6/ 30 GF	16
Tabela 7: Temperatura kompavdiranja	17
Tabela 8: Parametri kompauderja	18
Tabela 9: Parametri paletirnika	19
Tabela 10: Parametri sušenja vzorcev	20
Tabela 11: Masa vzorca glede na pričakovan MFI	21
Tabela 12: POM – parametri	22
Tabela 13: TPU – parametri	23
Tabela 14: PP-H – parametri	23
Tabela 15: PA6 / 20 GF – parametri	23
Tabela 16: PA6 / 30 GF – parametri	24
Tabela 17: PC / GF – parametri	24
Tabela 18: PPS / 40 GF – parametri	24
Tabela 19: POM – analize Polycom	27
Tabela 20: POM – analize FTPO	27
Tabela 21: TPU – analize Polycom	29
Tabela 22: TPU – analize FTPO	29
Tabela 23: PP-H – Polycom	31
Tabela 24: PP-H – analize FTPO	31
Tabela 25: PA6 / 20 GF – analize Polycom	32
Tabela 26: PA6 / 20 GF – analize FTPO	33
Tabela 27: PA6 / 30 GF – analize Polycom	34
Tabela 28: PA6 / 30 GF – analize FTPO	34
Tabela 29: PA6 / 30 GF + 10r – analize Polycom	35
Tabela 30: PA6 / 30 GF + 10 % reciklata – analize FTPO	36
Tabela 31: PA6 / 30 GF + 30r – analize Polycom	37
Tabela 32: PA6 / 30 GF + 30 %reciklata – analize FTPO	37
Tabela 33: PA6 / 30 GF + 50r – analize Polycom	38
Tabela 34: PA6 / 30 GF + 50 % reciklata – analize FTPO	38
Tabela 35: PC / GF – analize Polycom	40
Tabela 36: PC / GF – analize FTPO	40
Tabela 37: PPS / 40 GF – analize Polycom	41
Tabela 38: PPS / 40GF – analize FTPO	42

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

MFI - Indeks tečenja taline (g / 10 min)

MVR - Volumski indeks tečenja taline (cm³ / 10 min)

σ - Standardni odklon (g / 10 min)

T - Temperatura (°C)

m - Masa (g)

t - Čas (s)

F - Sila (N)

P - Tlak (Pa)

ρ - Gostota (g/cm³)

n - Število meritev (/)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

MFI - Melt Flow Index – masni indeks tečenja taline

MVR - Melt Volume Rate – volumski indeks tečenja taline

STD - Standardni odklon

ISO - International Organization for Standardization – mednarodna organizacija za standardizacijo

PA6 - Poliamid 6

POM - Polioksimetilen

TPU -Termoplastični poliuretan

PP-H - Polipropilen homopolimer

PC - Polikarbonat

PPS - Polifenilen sulfid

GF - Glass Fibers – steklena vlakna

FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov

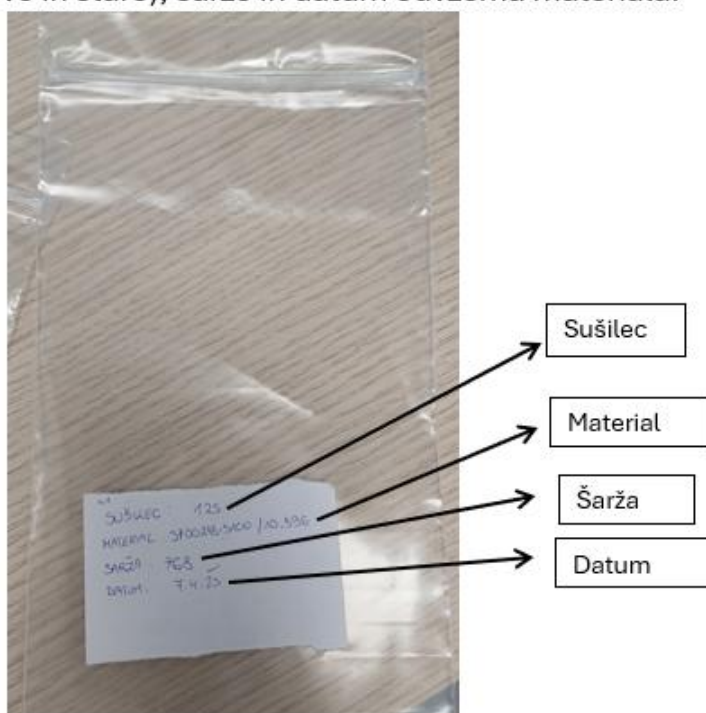
R&R - ponovljivost procesa oz. meritev

PRILOGE**Priloga 1: Navodila za uporabo MFI naprave**

MFI-navodila za uporabo:

**PRED UPORABO JE POTREBNO PREBRATI CELOTEN
POSTOPEK**

1. Pripravimo vrečko za odvzem granulata, zapisati je potrebno sušilec, številko materiala (novo in staro), šaržo in datum odvzema materiala:

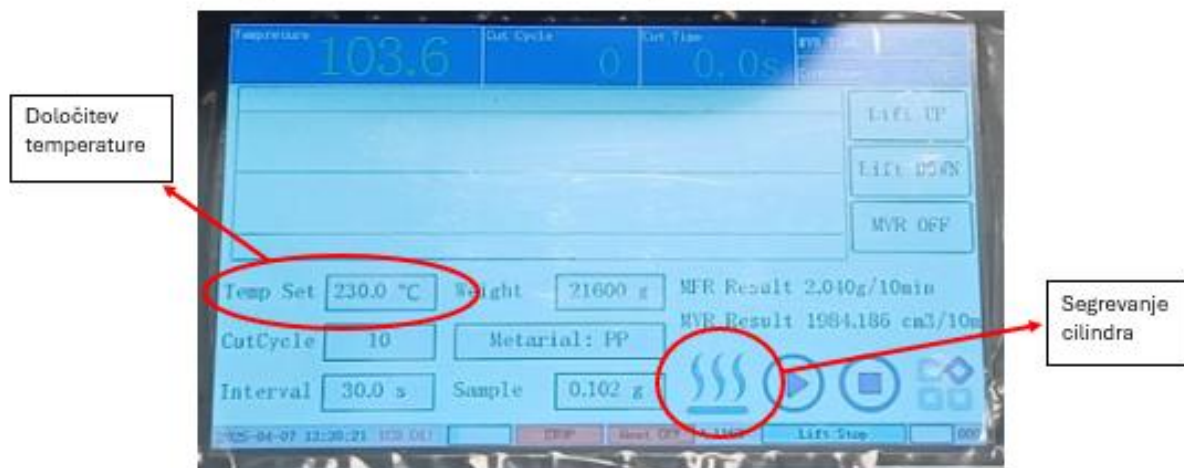


Slika 40: Navodila za uporabo MFI str. 1

2. Napravo prižgemo:

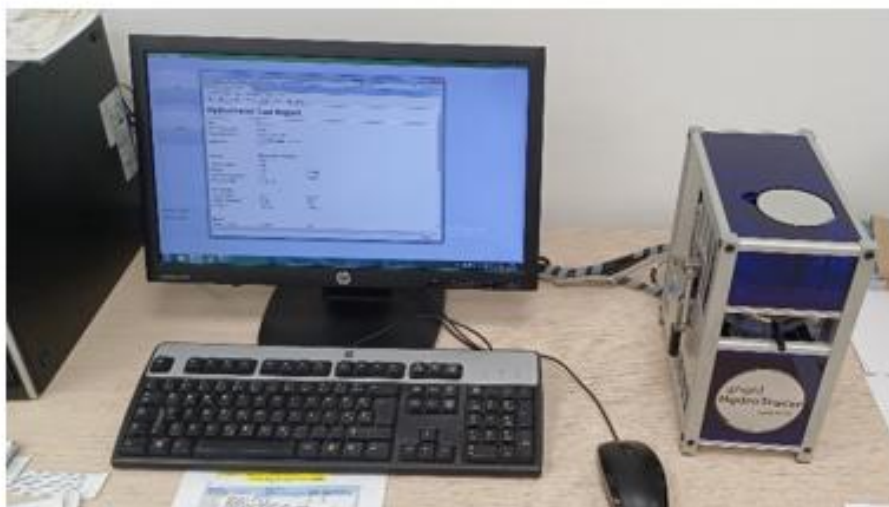


3. Ogrevanje naprave, določimo temperaturo segrevanja in pritisnemo na oznako, (podatke odčitamo iz metod MFI):



Slika 41: Navodila za uporabo MFI str. 2

4. **Sušenje materiala**, pred izvedbo analize je potrebno material popolnoma posušiti (tako zahteva standard):



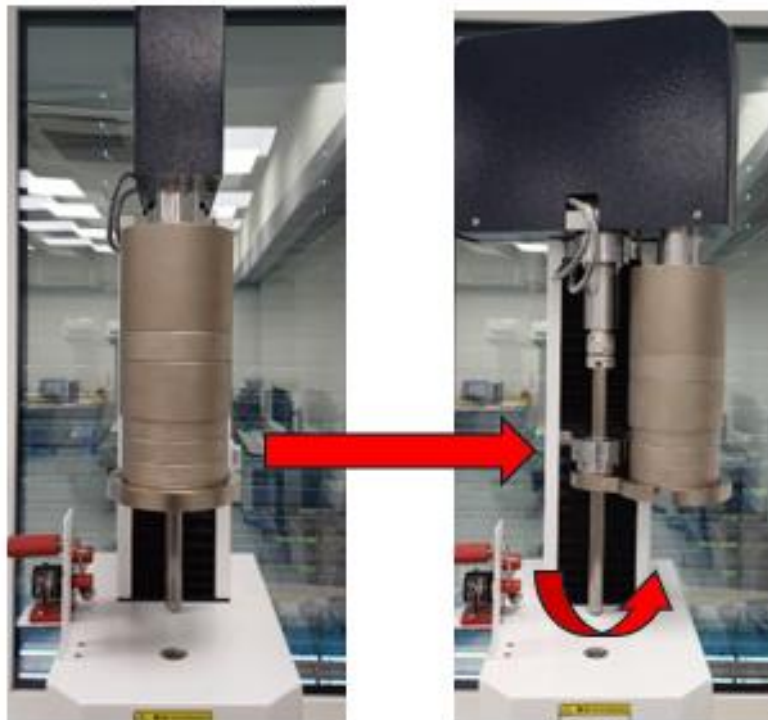
(Če material ni popolnoma posušen je potrebno material sušiti do določene vrednosti)

5. **Material stehtamo**, na precizni tehtnici, (potrebno količino odčitamo iz meritev MFI):

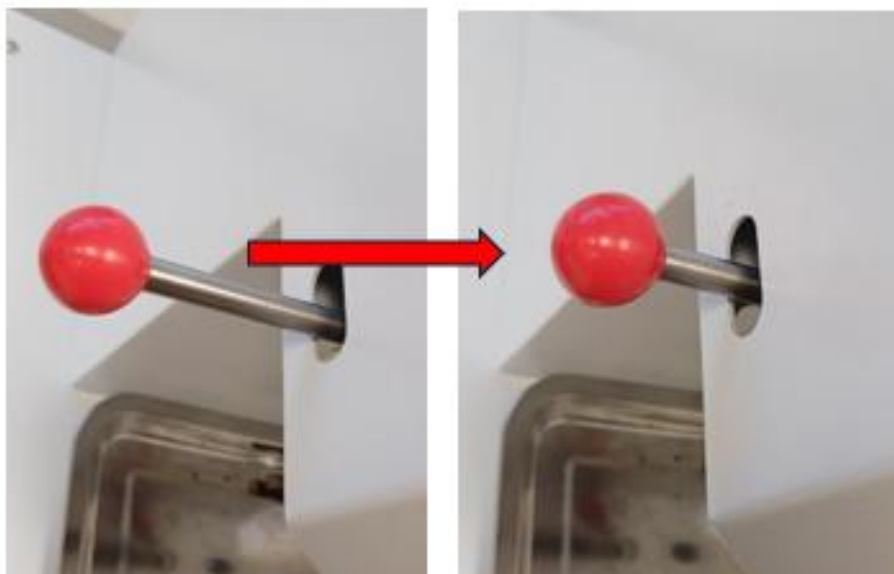


Slika 42: Navodila za uporabo MFI str. 3

6. Odstavimo uteži, če so že, to ni potrebno:



7. Zapremo ročico:



Slika 43: Navodila za uporabo MFI str. 4

8. Šobo nastavimo v cilindar in preverimo ali je na dnu cilindra:



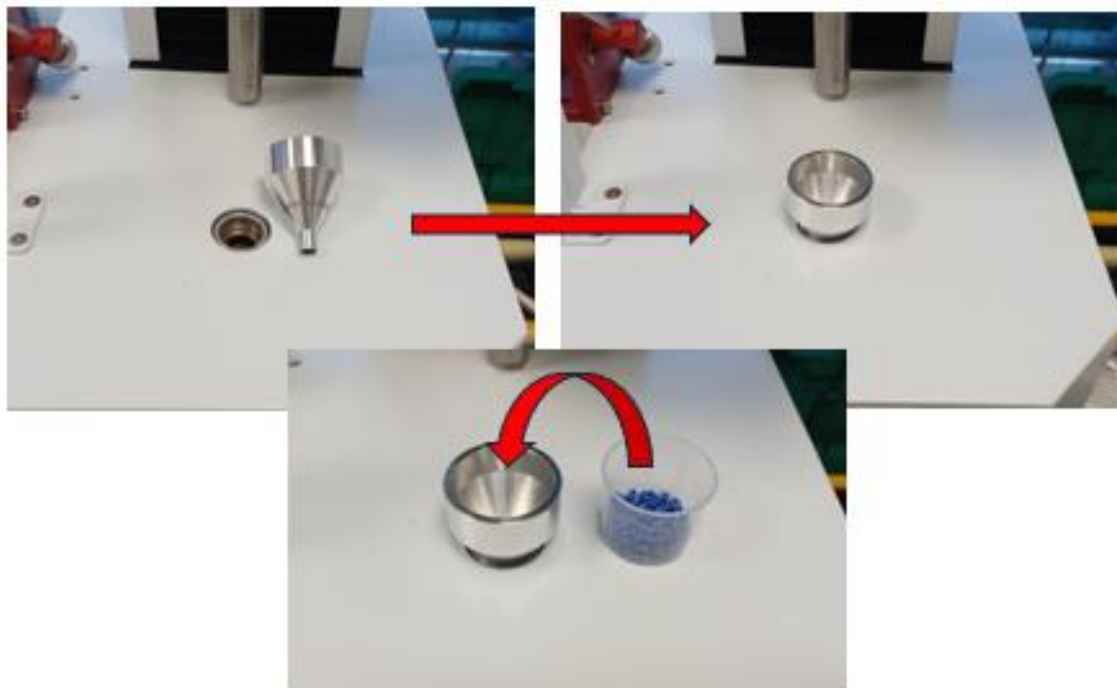
9. Postavimo pladenj:



10. Počakamo, da se naprava segreje do željene temperature.

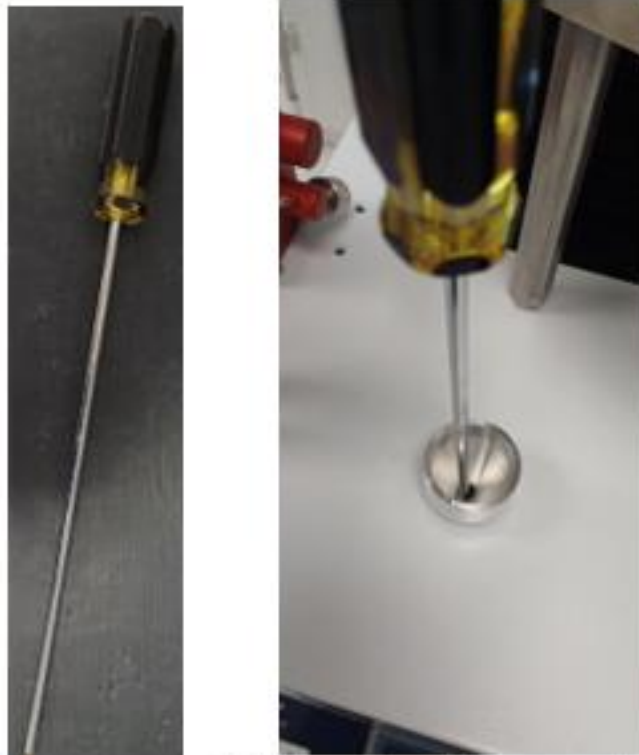
Slika 44: Navodila za uporabo MFI str. 5

11. **Nastavimo lij**, v odprtino cilindra in skozenj **nasujemo natehtan material**, če ga je preveč enostavno granule potisnemo z železno palico:



Slika 45: Navodila za uporabo MFI str. 6

Železna palica:

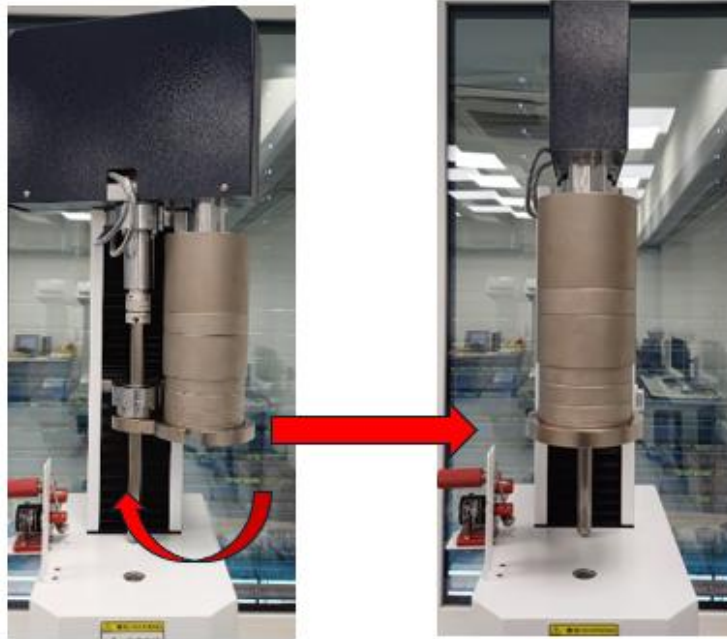


12. **Nastavimo bat** z osnovno utežjo, če se ta ne lepo posede, ga rahlo pritisnemo:



Slika 46: Navodila za uporabo MFI str. 7

13. Pristavimo uteži:

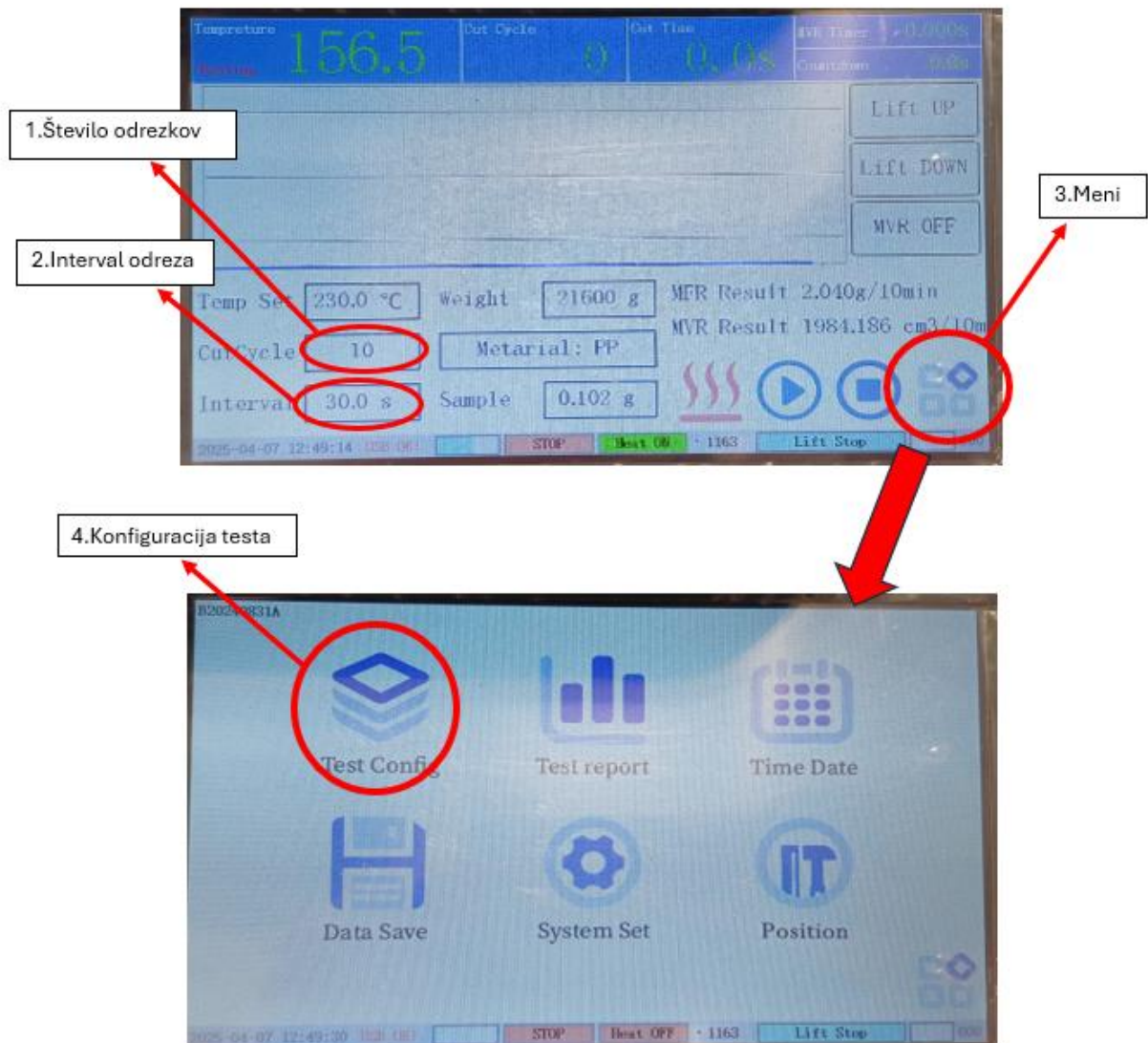


14. Stisnemo tipko **Countdown**, ta odštevava 240 sekund:

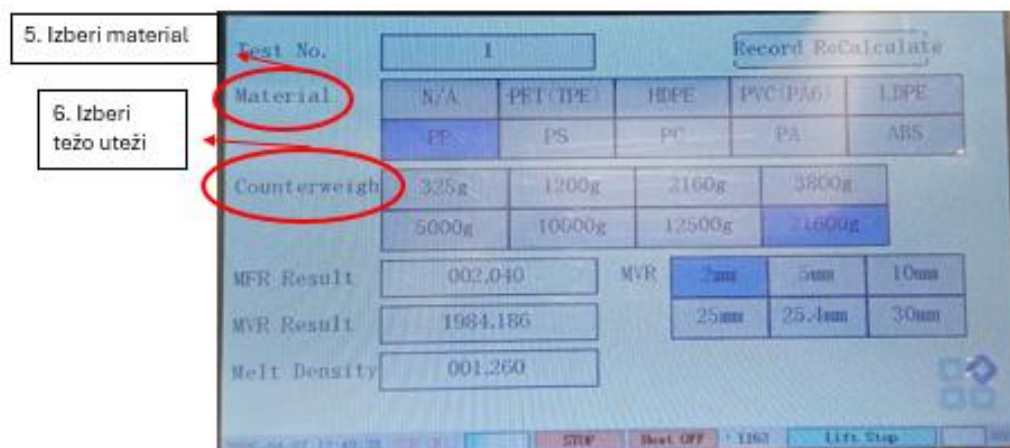


Slika 47: Navodila za uporabo MFI str. 8

15. Med odštevanjem na napravi **določimo parametre**, ki jih imamo določene za vzorčni granulat:



Slika 48: Navodila za uporabo MFI str. 9

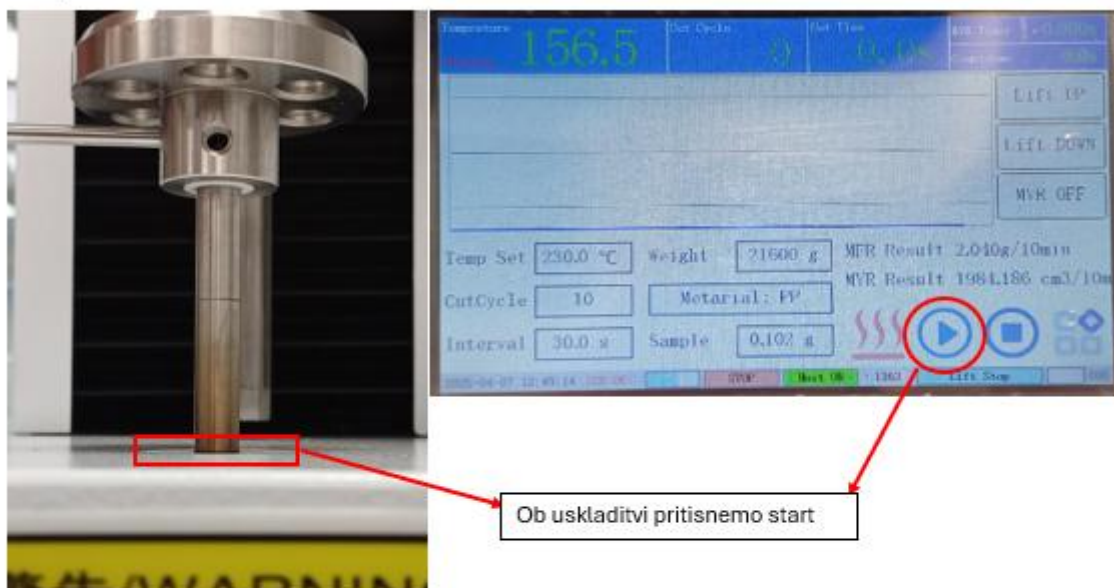


16. Po odštevanju se uteži spustijo na bat, spremljamo postopek!

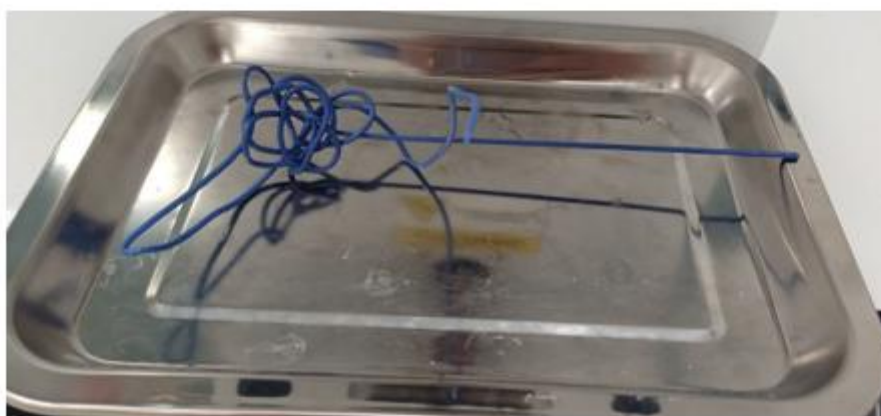


Slika 49: Navodila za uporabo MFI str. 10

17. Ko se na batu, prva zreza uskladi z višino površine, na ekranu stisnemo tipko Start:

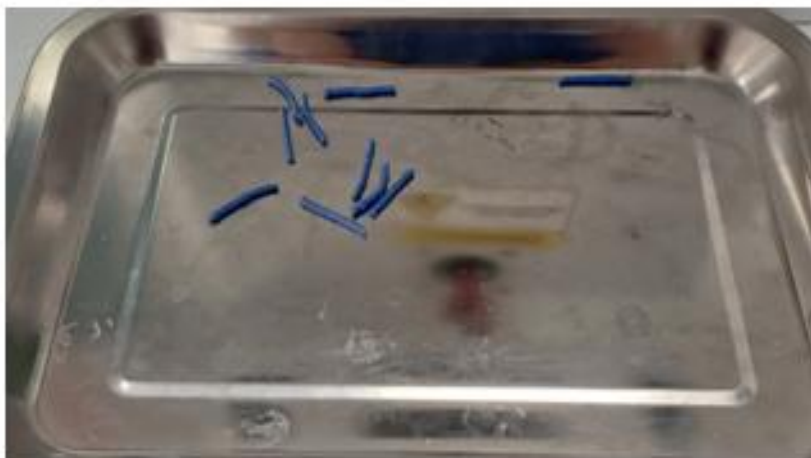


18. Rezalo naredi prvi odrez, ki ga zavržemo:



Slika 50: navodila za uporabo MFI str. 11

19. Naprava naredi določeno število odrezkov po določenem časovnem intervalu:

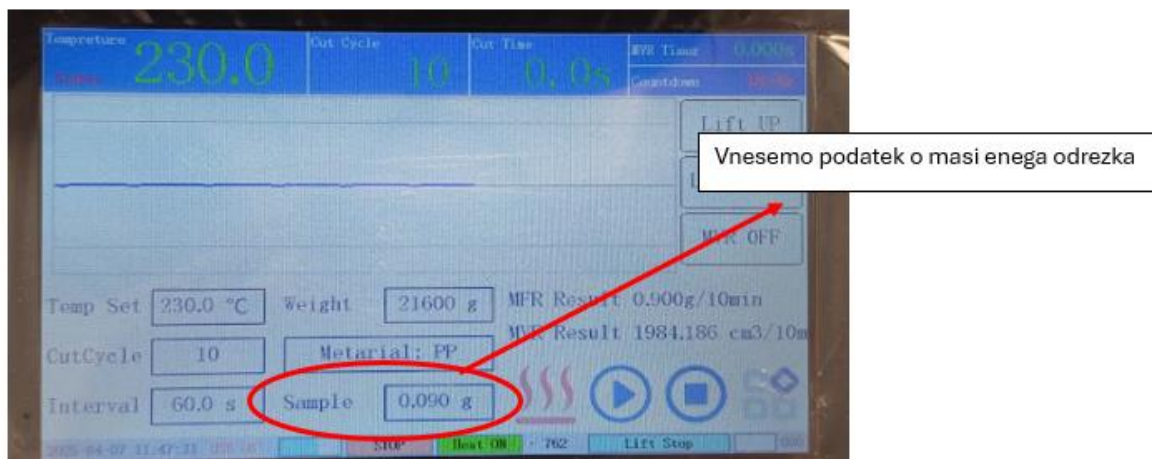


20. Odrezke pustimo, da se ohladijo nato jih tehtamo. Dobljeno maso delimo s številom odrezkov



Slika 51: Navodila za uporabo MFI str. 12

21. Dobljen rezultat vnesemo v kvadrček kjer piše Sample in na desni se nam izpiše številka, MFR=.... .



22. Napravo je potrebno očistiti po vsaki analizi! NASLEDNJA STRAN!

Slika 52: Navodila za uporabo MFI str. 13

Postopek čiščenja: **OBVEZNA ZAŠČITA ROKAVICE!!**



Pustimo, da ves material steže skozi šobo, odstavimo uteži in izpulimo bat.
HITRO počistimo s krpico.



Slika 53: Navodila za uporabo MFI str. 14

Odpremo ročico ter s kovinsko palico potisnemo šobo skozi cilinder,
UJAMEMO GA Z ROKO!

Šobo **HITRO** prebodemo z šobnim nastavkom, tako se material ne bo strdil v
šobi! Očistimo jo s krpico



Slika 54: Navodila za uporabo MFI str. 15

Cilinder očistimo s pomočjo palice za čiščenje šobe in krpice. Če je potrebno
tudi s krtačo Čistimo dokler je cilinder brez madežev.



Slika 55: Navodila za uporabo MFI str. 16