



B2/T7

Változat: 1.1

Kiadva: 2025. március 24.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

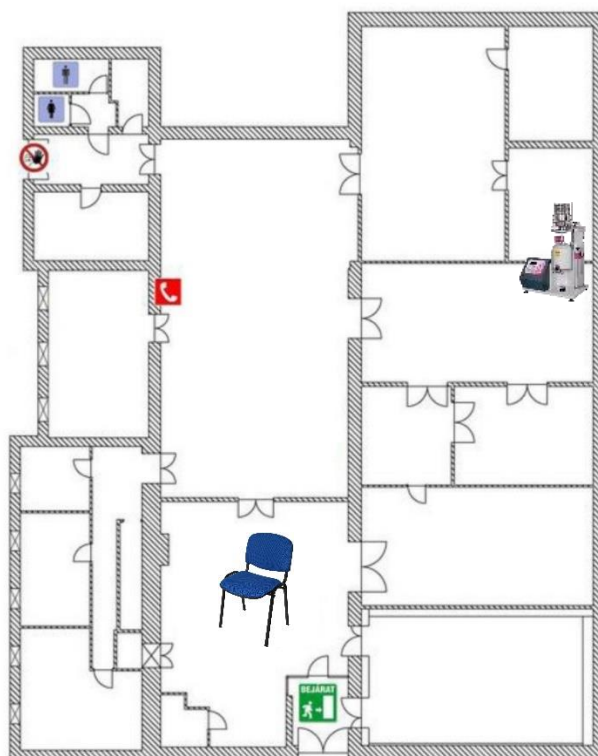
MT épület

Újrahasznosítás

HŐRE LÁGYULÓ MŰANYAGOK ÚJRAHASZNOSÍTHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI HONLAPON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE



MT
épület

TARTALOMJEGYZÉK

1.	A LABORGYAKORLAT CÉLJA	3
2.	ELMÉLETI HÁTTÉR	3
2.1.	MŰANYAGOK ÚJRAHASZNOSÍTÁSÁVAL KAPCSOLATOS EURÓPAI UNIÓS SZABÁLYOZÁSOK.....	4
2.2.	A LAKOSSÁGI MŰANYAGHULLADÉK BEGYŰJTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI ÉS FONTOSSÁGA	4
2.3.	VISSZAGYŰJTÖTT MŰANYAGHULLADÉK ÚJRAHASZNOSÍTÁSÁNAK FOLYAMATA	5
2.4.	A FOLYÓKÉPESSÉG, A FOLYÁSI MUTATÓSZÁMOK ÉS SZABVÁNYOS MEGHATÁROZÁSUK	6
2.5.	AZ MFI MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE.....	9
3.	A MÉRÉS LEÍRÁSA, ELVÉGZENDŐ FELADATOK.....	9
4.	A MÉRÉS SORÁN HASZNÁLT GÉPEK, BERENDEZÉSEK	10
5.	A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETŰL	10
6.	FELHASZNÁLT IRODALOM	10
	MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV	11

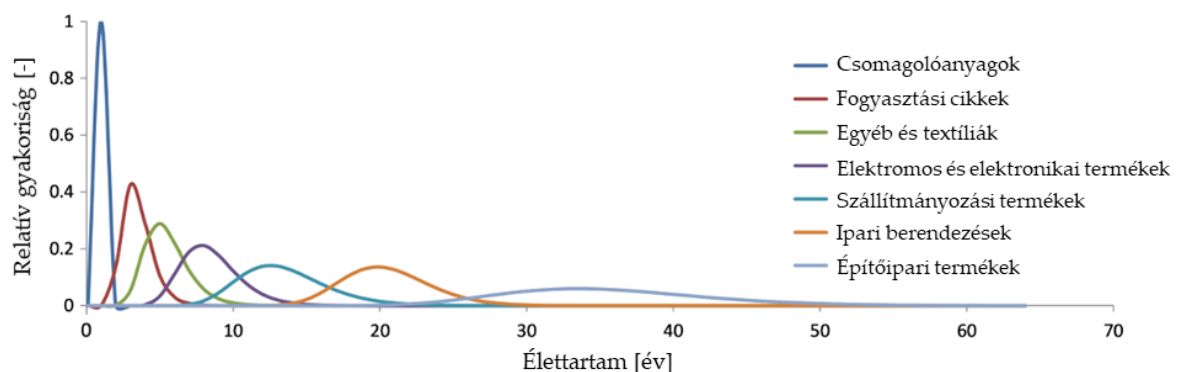
1. A laborgyakorlat célja

A laborgyakorlat célja a hőre lágyuló polimerek újrahasznosítási lehetőségeinek és korlátainak megismerése. Az eredeti és újrahasznosított anyagok tulajdonságainak összehasonlítása, amelyre a gyakorlaton választott módszer a polimerfeldolgozó-iparban elterjedt, szabványos folyási mutatószámok (MFI, MVR) meghatározása. Továbbá az MFI berendezés használatának megismerése.

2. Elméleti háttér

A környezettudatos gyártók az eredeti alapanyagok mellett egyre nagyobb mennyiségben gyártják részben vagy teljesen újrahasznosított alapanyagból a termékeiket. A gazdasági érdekeken és a társadalmi elvárásokon kívül Európai Unió irányelvek és az Országos Hulladékgazdálkodási Terv is szabályozza a felhasználható csomagolóanyagokat, illetve ezeknek az anyagában történő újrahasznosítási arányait a körkörös gazdaság szempontjait figyelembe véve.

A statisztikai adatok szerint 2022-ben 400,3 millió tonna műanyagot állítottak elő a világon, aminek kb. 40%-ából csomagolóanyag készült. Azonban a csomagolóanyagok, funkciójukból adódóan nagyon rövid használati idejűek (akár csupán néhány nap), emiatt rövid időn belül (átlagosan 0,5 év) hulladékként jelentkeznek (1. ábra). Azonban ez a hulladékfrakció sokkal értékesebb annál, hogy hulladéklerakóba, hulladékégetőbe kerüljön, ezért törekedni kell az anyagában történő újrahasznosítására.



1. ábra A termék élettartamának eloszlása, nyolc különböző ipari szektor esetén

2.1. Műanyagok újrahasznosításával kapcsolatos Európai Unió szabályozások

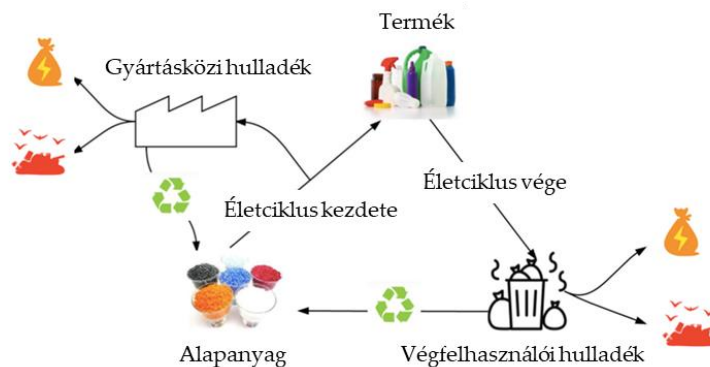
Az elmúlt években több Európai Unió irányelv is érvénybe lépett, amelyek a fenntarthatóságot szem előtt tartva az újrahasznosítási arányok növelését szorgalmazzák. Ezek közül a két legfontosabbat részletesebben is ismertetjük.

Az EU 2018/852 irányelve szerint legkésőbb 2025. december 31-ig az összes csomagolási hulladék legalább 65 tömegszázalékát újra kell hasznosítani. Ezen belül a minimális célértékek: műanyagok esetében 50 tömegszázalék, fa esetében 25 tömegszázalék, vassfémek esetében 70 tömegszázalék, alumínium esetében 50 tömegszázalék, üveg esetében 70 tömegszázalék, papír és a karton esetében 75 tömegszázalék. Továbbá legkésőbb 2030. december 31-ig az összes csomagolási hulladék legalább 70 tömegszázalékát újra kell hasznosítani.

Az EU 2019/904 irányelve szerint 2025-től kezdődően a poli(etilén-tereftalát) (PET) palackoknak legalább 25%-ban újrafeldolgozott műanyagot kell tartalmazniuk az adott tagállam területén forgalomba hozott összes PET-palack átlagaként számítva, 2030-tól kezdődően pedig legalább 30%-ot. Ezzel párhuzamosan 2025-re az adott évben forgalomba hozott egyszer használatos PET palackok 77 tömegszázalékának megfelelő mennyiséget vissza kell gyűjteni. Továbbá 2029-re el kell érni legalább 90 tömegszázalékot. E cél elérése érdekében a tagállamok kialakíthatnak betétdíjas rendszert.

2.2. A lakossági műanyag hulladék begyűjtésének lehetőségei és fontossága

A keletkezés szintje szerint a szilárd műanyag hulladékot két csoportra: gyártásközi, illetve végfelhasználói hulladékokra lehet bontani (2. ábra).



2. ábra A polimerek életciklusa befejeződhet újrahasznosítással (♻️), energetikai célú hasznosítással (🔥) és lerakással (🗑️)

Tipikus gyártásközi hulladék a fröccsöntés során keletkező beömlőrendszer (angus), az anyagváltási hulladék, a gyártásközi selejt és a szélhulladék. A gyártásközi hulladéknak megvan az az előnye, hogy általában tiszta és ismert az összetétele, nem szennyezett más polimerekkel és egyéb anyagokkal. Emiatt ez a jó minőségű, homogén hulladék legtöbbször gazdaságosan és egyszerűen újrahasznosítható. Darálva vagy regranulálva (darálék granulálása a könnyebb feldolgozhatóság miatt), megfelelő arányban akár az eredeti műanyaghoz keverve visszavezethető a technológia elejére. Emiatt ezt a folyamatot gyakran zárt láncú újrahasznosításnak is szokták nevezni. Azonban a különböző fém inzeretek, bevonatok és festékek esetleges használata megnehezítheti az újrahasznosítást.

A gyártásközi hulladékkal szemben a végfelhasználói műanyag hulladékot vissza kell gyűjteni a felhasználóktól, amely kétféle módon történhet: szelektív gyűjtéssel vagy betétdíjas rendszer útján. A szelektív hulladékgyűjtés lényege, hogy bizonyos csoportosítás szerint, a különböző hulladéktípusokat egymástól elkülönítve gyűjtik össze. A szelektív hulladékgyűjtésre többféle módszer is kialakult, amelyek külön-külön, vagy egymással párhuzamosan is alkalmazhatóak. Ilyen módszer a hulladékudvarokban, illetve a hulladékgyűjtő szigetekken történő gyűjtés és a házhoz menő szelektív hulladékgyűjtés. A végfelhasználóktól szelektíven összegyűjtött hulladék tipikusan ismeretlen összetételű vegyes műanyagokból áll, amely potenciálisan szerves (pl. ételmaradék, papír) és szervetlen (pl. ragasztóanyag) frakciókkal szennyezett, színezett, illetve tartalmazhat különböző töltő-, erősítő- és adalékanyagokat is.

A betétdíjas rendszert gyakran használják csomagolási hulladékok elkülönített visszagyűjtésére. Ennek az az alapja, hogy a fogyasztó visszakapja a betétdíjas termék megvásárlásakor kifizetett betétdíjat, amikor visszaviszi a csomagolóanyagot a kiskereskedelmi egységbe. Ezzel a módszerrel, a visszagyűjtött hulladék általában egynemű és valószínűleg kevésbé szennyezett, mint a szelektíven gyűjtött, ezáltal kevésbé költséges és bonyolult az újrahasznosítása.

2.3. Visszagyűjtött műanyag hulladék újrahasznosításának folyamata

A visszagyűjtött műanyag hulladék újrahasznosítási folyamatát a PET palackok példáján mutatjuk be ([videó](#)), mivel a visszagyűjtött, jó minőségű (válogatott, mosott) PET palack darálékból vagy regranulátumból akár élelmiszeripari, az eredetivel megegyező minőségű termék is gyártható (pl. PET palackból újra palack). De gyártanak belőlük dekorfóliát bútorokra, textilipari termékeket, illetve műszaki célú termékeket is.

A válogatott PET hulladékot bálázzák, majd eljuttatják egy újrahasznosító üzembe. Itt első lépésként ledarálják a palackokat a kupakkal együtt, majd egy melegvizes, vegyszeres mosóba kerülnek. Ebben a lépésben feloldódik a ragasztó, ezáltal elválik egymástól a címke és a palack. Ezután a vegyes darálék egy úsztató mosóba kerül, ahol a víznél kisebb sűrűségű polietilén (PE) vagy polipropilén (PP) címke és kupak úszni fog a kád tetején, amíg a víznél nagyobb sűrűségű PET lesüllyed a kád aljára. Ezáltal egy egyszerű sűrűségkülönbségen alapuló módszerrel szétválaszthatóak a különböző sűrűségű műanyagok egymástól. Ezek után igény szerint további válogatási módszerek is lehetnek (pl. szín szerinti válogatás). A válogatott, tisztított darálékból regranulátumot vagy közvetlenül terméket állítanak elő.

2.4. A folyóképesség, a folyási mutatószámok és szabványos meghatározásuk

Az újrahasznosítás során a feldolgozás okozta degradáció a legtöbb esetben molekulatömegcsökkenéssel jár. Ez a csökkenés pedig nagymértékben befolyásolja az anyag, illetve a későbbiekben a termék mechanikai, anyagszerkezeti, optikai és reológiai tulajdonságait is.

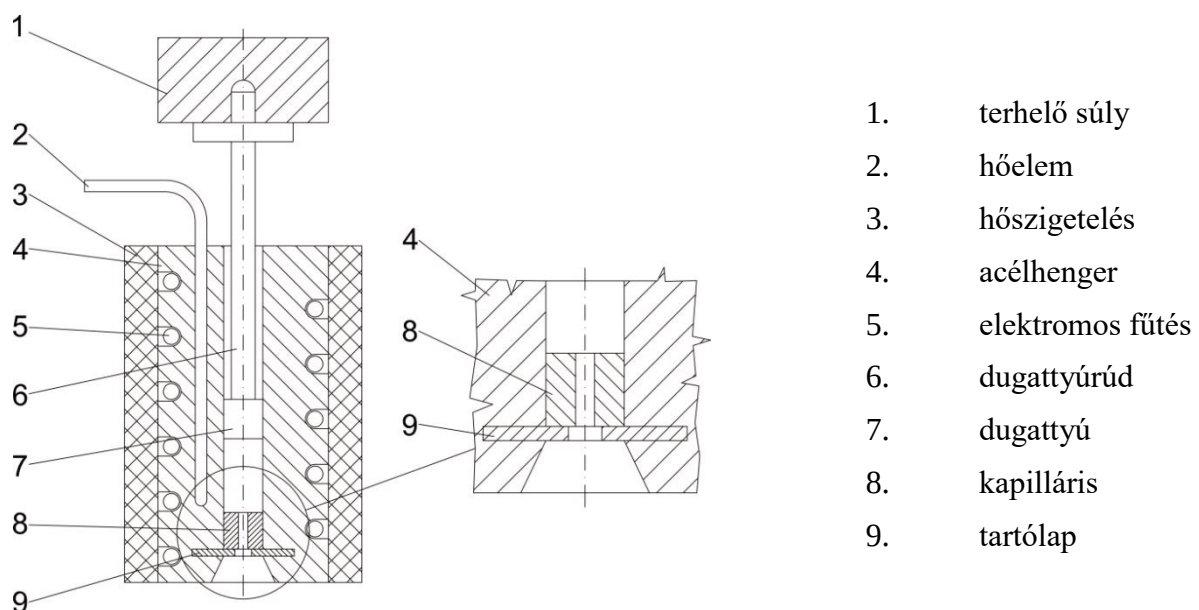
A folyóképesség a hőre lágyuló polimerek fontos reológiai tulajdonsága. **Folyóképesség (Φ)** alatt a **dinamikai viszkozitás (η [Pa·s]) reciprokát értjük. A dinamikai viszkozitás szoros összefüggésben van az átlagos molekulatömeggel. Kisebb/rövidebb molekulákból álló polimer ömledékének kisebb a dinamikai viszkozitása, mint az ugyanolyan ismétlődő egységeket tartalmazó, de hosszabb láncokból álló polimerének. **Növekvő deformációsebesség, illetve igénybevétel mellett történő feldolgozás esetén a polimer ömledék viszkozitása tovább csökkenthető.****

A polimer ömledékek viselkedésének, tulajdonságainak modellezése és mérése alapvetően szükséges a műanyagok feldolgozásához, a polimer termékek előállításához. Tájékoztatásul az 1. táblázatban néhány feldolgozási technológiára vonatkozóan a fellépő alakváltozási sebességek tartománya található, természetesen csak durva, nagyságrendi arányokat jelölve. A nyilak a növekedés irányát jelzik.

Feldolgozási technológia	Nyírósebesség	Dinamikai viszkozitás	Átlagos molekulatömeg	Folyási mutatószám
	$\dot{\gamma}$ [1/s]	η [Pa·s]	M_w [g/mol]	MFI [g/10min]
Sajtolás	10	10 000	$>10^6$	
Kalanderezés	10^2	1000	10^5	
Extrudálás	10^3 - 10^4	100-1000	10^5	
Fröccsöntés	10^4 - 10^6	10-100	10^4	
Szálgyártás	$>10^6$	10	10^3	

1. táblázat Alapvető polimerfeldolgozási technológiák alakváltozási sebessége

A **folyóképesség** gyakorlati jellemzésére a könnyen és egyértelműen meghatározható **szabványos folyási mutatószám** használatos. Jele **MFI** (Melt Flow Index, [g/10 perc]) vagy **MFR** (Melt Flow Rate, [g/10 perc]). A **szabványos folyási mutatószám** az a grammokban kifejezett anyagmennyiség, amely a vizsgálati és anyagszabványban előírt hőmérséklet és nyomás mellett a szabványos mérőkészülék kifolyónyílásán 10 perc alatt kifolyik. Az MFI mellett gyakran használatos a térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószám, az **MVR** (Melt Volume Rate [cm³/10 perc]), amely esetében nem a kifolyt polimerömladék tömegét, hanem térfogatát adjuk meg. A folyási mutatószám meghatározására szolgáló készülék, a **kapilláris plasztométer** vázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra A kapilláris plasztométer vázlata

A (7) dugattyú a (4) fűtött acélhengerben lévő megömlesztett anyagra nyomást gyakorol, és azt a (8) szabványos kapillárison át kisajtolja. A henger az (5) elektromos fűtéssel fűthető. A

hőmérséklet a (2) hőelemmel mérhető és hőfokszabályozóval a kívánt értékre beállítható. A szükséges nyomást az (1) terhelő súllyal lehet biztosítani. A dugattyú magasságát egy szenzor érzékeli, és egy beépített kés pontosan a kapilláris kifolyónyílásánál vágja el a kifolyó polimerömléket, amikor a dugattyú a beállított kezdő- és végmagasságokat eléri ([videó](#)).

A szabványos körülmények között elvégzett vizsgálat kiértékelése:

A berendezés önállóan az **MVR** (Melt Volume Rate) **térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószám** meghatározására képes, de ha megmérjük a kifolyt polimerömlék tömegét, annak segítségével kiszámítható a **tömegre vonatkoztatott folyási mutatószám (MFI, Melt Flow Index)**:

$$MVR_{(T, m_{nom})} = \frac{V \cdot s}{t} \quad \text{és} \quad MFI_{(T, m_{nom})} = \frac{m \cdot s}{t} \quad (12, 13)$$

ahol: MVR	[cm ³ /10 perc];	térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószám,
MFI	[g/10 perc];	tömegre vonatkoztatott folyási mutatószám,
T	[°C];	vizsgálati hőmérséklet,
m _{nom}	[kg];	terhelő tömeg,
s	[s/10 perc];	a szabványos időnek (10 perc = 600 s) megfelelő váltószám, s = 600 s/10perc
V	[cm ³];	két vágás közt kisajtott polimerömlék térfogata,
t	[s];	két vágás közt eltelt idő,
m	[g];	két vágás közt kisajtott polimerömlék tömege.

A kapilláris plasztométer lehetővé teszi a vizsgált polimerömlék folyási mutatószámainak tetszés szerinti (a készülék lehetőségeinek határain belüli) hőmérséklet és terhelőerő melletti meghatározását. A kapilláris plasztométerrel történő mérés előnye egyszerűsége és gyorsasága, ezért **széles körben használják a gyakorlatban, főként minőségellenőrzés céljára**. A reciklált anyagok esetén különösen fontos a degradáció nyomon követése, illetve minőségellenőrzés, amire szintén jó megoldás lehet az MFI érték változásának vizsgálata.

Az MFI értékének megadási módját szabvány írja elő, így például az MFI_(190; 2,16)=4,0 g/10 perc azt jelenti, hogy 190 °C hőmérsékleten, 2,16 kg-os tömeg alkalmazásával az adott anyag folyási mutatószáma 4 g/10 perc.

2.5. Az MFI mérés kiértékelése

Az MFI készülék önállóan az MVR [$\text{cm}^3/10$ perc] térfogatáram mérésére alkalmas. A kapillárison két vágás közt kisajtott polimerömledék tömegét mérlegen kell lemérnünk. Így a mérést követően az alábbi adatok állnak rendelkezésünkre: MVR [$\text{cm}^3/10$ perc], t [s], m [g].

3. A mérés leírása, elvégzendő feladatok

A mérés menete:

A granulátumot az MFI mérő készülék felfűtött hengerébe töltjük, közben tömörítjük a légzárványok kihajtása céljából. A töltést akkor fejezzük be, amikor a polimer granulátum szintje a henger felső pereme alatt kb. 5-10 mm-re van. A dugattyúrúd a hengerbe helyezzük, majd a terhelő tömegeket tartó állványt mérő helyzetbe fordítjuk és rögzítjük. Elindítva az MFI berendezéshez kapcsolt számítógépen a vezérlőprogramot, a berendezés egy előre meghatározott előmelegítési idő elteltével (ennek célja, hogy a hengerben lévő granulátum teljes egészében ömledékállapotba kerüljön) előtömörítést végez (az ömledéket összenyomva kiszorítja a levegőbuborékokat), majd a tömegeket a dugattyúrúdra helyezi. Ennek hatására a kapillárison keresztül megkezdődik a polimerömledék kiáramlása. Akkor kezdődik a mérés, amikor a készüléken található vágószerkezet kése levágja az extrudátumot (ezt a kezdeti darabot nem használjuk). A mérés végeztével, miután a dugattyúrúd megtett egy előre meghatározott hosszúságú utat a hengerben, a készüléken található vágószerkezet kése ismét levágja az extrudátumot. A levágott extrudátumot csipesszel (még meleg!) a mérleg tányérjára helyezzük, és leolvassuk a tömegét. Mivel a berendezés csak térfogatáramot mér, az extrudátum tömegét nekünk kell lemérni, de az összes többi szükséges paramétert (térfogatáram, eltelt idő) le lehet olvasni a berendezésről.

A mérés során egy eredeti és egy reciklált alapanyagot vizsgálunk, hogy meghatározzuk az újrahasznosítás folyóképességre gyakorolt hatását.

A mérésen elvégzendő feladatok:

- A vizsgált anyagok térfogatra és tömegre vonatkoztatott folyási mutatószámának meghatározása kapilláris plasztométerrel állandó hőmérséklet és terhelés mellett.

4. A mérés során használt gépek, berendezések

- Kapilláris plazztométer: CEAST Modular Melt Flow 7027.000
- 0,001 g pontosságú mérleg: Radwag PS 200/2000.R1

5. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
Folyási mutatószám, MFI	Melt Flow Index (MFI) Melt Flow Rate (MFR)	der Schmelzindex

6. Felhasznált irodalom

1. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000, 115-166. old.
2. Ronkay F., Dobrovsky K., Toldy A.: Műanyagok újrahasznosítása. BME Gépészmérnöki Kar, Budapest (2015).

A segédletben szereplő, a tananyag megértését segítő videó QR-kódja:

MFI mérés



PET
újrahasznosítás





MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Név: Jegy:

Neptun kód:

Dátum: Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. A feladat

- A vizsgált anyag tömeg- és térfogatáramának meghatározása kapilláris plasztométerrel állandó hőmérséklet és különböző terhelések mellett.

2. Alapadatok, mért és számított eredmények

A készülék típusa:	CEAST Modular Melt Flow 7027.000
Kapilláris hossza, l	8 mm
Kapilláris sugara, R	1 mm
Dugattyú átmérője, D	9 mm
Vizsgálati hőmérséklet, T	°C
Vizsgálati tömeg, m	kg

A mérés során egy eredeti és egy reciklált alapanyagot vizsgálunk, hogy meghatározzuk az újrahasznosítás folyóképességre gyakorolt hatását.

3. A mért és számított eredmények

Vizsgált anyag:

	MVR [cm ³ /10 perc]	MFI [g/10 perc]
Eredeti alapanyag		
Reciklált alapanyag		