

GERGELY ATTILA LEVENTE

POLIMER ANYAGOK

**ANYAGTUDOMÁNYI ÉS FELDOLGOZÁSTECHNIKAI
LABORATÓRIUMA**

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS FÜZETEK



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET

GERGELY ATTILA LEVENTE

**POLIMER ANYAGOK ANYAGTUDOMÁNYI ÉS
FELDOLGOZÁSTECHNIKAI LABORATÓRIUMA**

GERGELY ATTILA LEVENTE

**POLIMER ANYAGOK
ANYAGTUDOMÁNYI ÉS
FELDOLGOZÁSTECHNIKAI
LABORATÓRIUMA**



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET

Kolozsvár

2022

A kutatást támogatta az MTA DOMUS-program
A kötet megjelenését támogatta Nemzeti Kulturális Alap,
a Magyar Tudományos Akadémia, a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt.,
a Communitas Alapítvány, az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya



© Gergely Attila Levente, EME 2022

Szaklektor:

Bitay Enikő, a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem egyetemi tanára,
az MTA külső tagja
Dobránszky János, tudományos tanácsadó, ELKH-BME Kompozittechnológiai
Kutatócsoport, Budapest

Kiadó: Erdélyi Múzeum-Egyesület
Felelős kiadó: Biró Annamária
Sorozatszerkesztő: Bitay Enikő
Olvasószervező: András Zselyke
Borítóterv: Könczey Elemér
Műszaki szerkesztő: Szilágyi Júlia

Nyomdai munkálatok:

F&F International Kft. Kiadó és Nyomda, Gyergyószentmiklós
Ügyvezető igazgató: Ambrus Enikő
Tel./Fax: +40-266-364171

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
GERGELY, ATTILA LEVENTE

**Polimer anyagok anyagtudományi és
feldolgozástechnikai laboratóriuma / Gergely Attila
Levente. - Cluj-Napoca : Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2022**
ISBN 978-606-739-229-6

678.7

DOI: 10.36242/mtf-18

TARTALOM

ELŐSZÓ	7
I. POLIMER ANYAGOK ANYAGTUDOMÁNYI LABORATÓRIUMA.....	9
1. A folyási mutatószám	11
1.1. Elméleti alapok.....	11
1.2. Egyedi tervezésű kapilláris plasztométer	16
1.3. Mérések	18
2. Szakítóvizsgálat.....	19
2.1. Elméleti alapok.....	19
2.1.1. A próbatest	23
2.1.2. A meghatározható mechanikai jellemzők	24
2.2. Egyedi tervezésű, egytengelyű szakítógépek	27
2.3. Mérések	29
3. Charpy-féle ütésvizsgálat.....	30
3.1. Elméleti alapok.....	30
3.2. Egyedi tervezésű Charpy-féle ingás ütőmű	34
3.3. Mérések	35
4. Keménységmérés	36
4.1. Elméleti alapok.....	38
4.1.1. Shore-keménységmérés.....	40
4.2. Egyedi tervezésű, Shore-keménységmérésre alkalmas berendezés	40
4.3. Mérések	41
5. Kúszás és feszültségrelaxáció	42
5.1. Elméleti alapok.....	42
5.1.1. Kúszás	44
5.2.1. Feszültségrelaxáció.....	46
5.2. Mérések	46
II. MŰANYAGOK FELDOLGOZÁSTECHNIKAI LABORATÓRIUMA.....	47
6. Darálás	49
6.1. Elméleti alapok	50
6.2. Egyedi tervezésű műanyagdaráló berendezés	50
6.3. Mérések	52

7. Extrúzió (kisajtolás).....	53
7.1. Elméleti alapok.....	54
7.2. Egyedi tervezésű extruder.....	57
7.3. Mérések	58
8. Granulátumkészítés	60
8.1. Elméleti alapok.....	60
8.2. Egyedi tervezésű, granulátumkészítő berendezés	62
8.2.1. Forgókéses granulátumkészítés	62
8.3. Mérések	63
9. Fröccsöntés.....	64
9.1. Elméleti alapok.....	64
9.1.1. A fröccsöntési ciklus	64
9.1.2. A fröccsöntő gép.....	66
9.2. Egyedi tervezésű, pneumatikus fröccsöntő gép	67
9.2.1. A fröccsöntő szerszám.....	70
9.2.2. Az üregnyomásmérés.....	72
9.3. Mérések	73
10. Vákuumformázás	74
10.1. Elméleti alapok.....	74
10.2. Egyedi tervezésű vákuumformázó berendezés	77
10.3. Mérések.....	77
11. Elektrosztatikus szálképzés.....	79
11.1. Elméleti alapok.....	79
11.2. Egyedi tervezésű mozgóberendezés.....	81
11.3. Egyedi tervezésű, forgódobos szálgyűjtő	83
11.4. Mérések.....	84
12. Centrifugális szálképzés	85
12.1. Elméleti alapok	85
12.2. Egyedi tervezésű centrifugális szálképző berendezés	86
12.3. Mérések.....	89
JELÖLÉSEK.....	90
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	92
SZAKIRODALOM.....	93
POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY LABORATORY	94
Contents	96
LABOR FÜR POLYMERWISSENSCHAFT UND -TECHNOLOGIE	98
Inhalt	100
LABORATOR DE ȘTIINȚA ȘI TEHNOLOGIA POLIMERILOR.....	102
Cuprins	104

ELŐSZÓ

A polimer anyagok – másként a műanyagok – nélkül a mindennapi élet jelen formájában elképzelhetetlen lenne. Az első, teljesen szintetikus polimer anyag, a bakelit, megjelenésével az elmúlt 130 év alatt oly mértékű fejlődés történt ebben a tudományágban, hogy napjainkban a polimer anyagok minden iparágban és számtalan felhasználásban fellelhetők. Ha csak a csomagolóanyagokra, gépek és berendezések alkatrészeire, elektronikai eszközök burkolatára – már a képernyőre is (polimer OLED) –, orvosi eszközökre és gyógyszerhordozókra, fogtömésre, szemüveglencsére, tömítőelemekre, textiliparra, csövekre, gumiiparra gondolunk is, az átlagember napi több alkalommal lép kapcsolatba a polimer anyagokkal. Ennek ellenére az iskolai tananyagban, de még a felsőoktatási alapozó tantárgyak keretében is csak kevés információ található meg a polimerekkel kapcsolatosan. A mérnöki oktatásban kiemelt szerepet kellene tulajdonítani a polimer anyagok bemutatására.

A Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemen felismerték a polimer anyagok fontosságát a mérnöki alkalmazásban és a szakemberhiányt Románia Erdély régiójában. Így a gépészmérnöki szakon két tantárgy keretében a polimer anyagok tulajdonsága és feldolgozástechnológiája van tárgyalva.

Ebben a könyvben olyan laboratóriumi gyakorlatokat ismertettek, melyek az anyagrészsel kapcsolatos alapismeretek gyakorlat útján történő elsajátítását teszik lehetővé. A laboratóriumi gyakorlatokban a témához kapcsolódó elméleti alapok bemutatása után, olyan berendezések ismertetése következik, melyeket államvizsga dolgozatok keretében terveztek és kiviteleztek. Így a laboreszközök, melyek lehetővé teszik az egyes anyagtulajdonságok tanulmányozását vagy a feldolgozási technika alapelveinek megismerését, mind a gépész- vagy mechanikai mérnök szakos hallgatók munkái. Ezek a megvalósítások, melyek költséghatékony tervezést igényeltek, viszont az alapelvek bemutatására kiválóan alkalmasak, inspirálhatják az alsóbb évfolyamos mérnök hallgatókat.

A könyv két részre tagolódik: az első rész a polimer anyagok alapvető mechanikai tulajdonságait tárgyalja, míg a második rész a polimerek, főként a hőre lágyuló műanyagok legfontosabb feldolgozási technikáit ismerteti. Az első laborgyakorlat a hőre lágyuló (termoplasztikus) polimerek feldolgozásához szükséges egyik legfontosabb anyagtulajdonságot kifejező mennyiségnek, a folyási mutatószámnak a mérésére irányul. A továbbiakban a polimer anyagok szakítóvizsgálata, a szívósság, a keménység és a viszkoelasztikus tulajdonságok vizsgálatára alkalmas mérési eljárások ismertetése következik.

A második rész a polimerek feldolgozástechnikai eljárásait tárgyalja, melyeket a polimer anyagok újrahasznosításával kapcsolja össze. A műanyagok alkalmazása számos előnnyel jár, viszont a polimerek rohamos fejlődésével és felhasználásával nem azonos ütemben fejlődött ezen anyagok hulladékgazdálkodása és az emberiség erre irányuló ismereteinek fejlesztése. Ennek köszönhetően a polimer anyagok szennyező hatása környezetünkre drasztikus hatást gyakorol. A könyv ebben a vonatkozásban ismerteti az olvasókkal az újrahasznosítás technológiai lépéseit, melynek első fázisa a szelektív hulladékgyűjtés után a darálás. A darált műanyagból extrúder segítségével szálakat állíthatunk elő, melyek darabolásával granulátumot kapunk. A granulátum a műanyag-feldolgozási eljárások legelterjedtebb alapanyagformája.

A következőkben a fröccsöntés, illetve a csomagolóiparban előszeretettel használt vákuumos hőformázás ismertetése kap helyet. A polimer anyagokból előállított nanoszálak szövedékeknek számos alkalmazása ismert. Az ezután soron következő két laborgyakorlat az elektrosztatikus és centrifugális szálképzési eljárást mutatja be, melyek a szálak előállításához elektrosztatikus vagy centrifugális erőt alkalmaznak.

A szerző

I. POLIMER ANYAGOK
ANYAGTUDOMÁNYI LABORATÓRIUMA

1. A FOLYÁSI MUTATÓSZÁM

A gyakorlat célja a hőre lágyuló műanyagok folyási tulajdonságainak megismerése és tanulmányozása. További cél a folyási mutatószám mérésére alkalmas, kapilláris plasztométer felépítésének megismerése.

1.1. Elméleti alapok

Egy műanyag termék gyártása esetén a granulátum formában levő nyersanyag hő hatására ömledékállapotba kerül. Ebben a formában relatíve könnyen megtörténik az alakadás, melyet a hűtési fázissal rögzítünk. Az alakadás során a műanyag ömledék a szerszámokban adott csatornákon keresztül folyik, és kitölti az üregeket, így létrehozva a végtermék kívánt alakját. Tehát fontos ismernünk a műanyag ömledék folyási tulajdonságait a folyamatok leírása és a megfelelő minőségű termék gyártása érdekében.

Az anyagok folyási tulajdonságát a viszkozitásuk segítségével jellemezzük. A viszkozitás tulajdonképpen egy folyadék belső ellenállását jelenti egy külső erőhatásra. Vagyis, ha egy folyadéknak nagy a viszkozitása, akkor jobban ellenáll egy külső erőhatásnak, tehát kevésbé folyékony. Ezzel ellentétben, ha kicsi a viszkozitása egy folyadéknak, akkor a külső erőhatásnak kevésbé áll ellen, tehát jobban folyik. A víz és a méz esete jó szemléltető példa, hiszen a gravitációs erő hatására a víz jobban folyik, mint a méz, így a víz kevésbé áll ellen az alakváltozásnak, tehát a viszkozitása is kisebb. A folyadékok folyási tulajdonságát a reológia tudományág vizsgálja.

A folyadékokat a külső erőhatásra adott viselkedés alapján két csoportba sorolhatjuk: *newtoni és nemnewtoni folyadékok*. A **1.1. ábrán** a *nyírófeszültség* (jele: τ) és a *deformációsebesség* (jele: $\dot{\gamma}$) viszonyát láthatjuk. A műanyag feldolgozása során a nyírási igénybevétel dominál, így általában erre az igénybevételre tárgyaljuk a folyási viselkedést. Abban az esetben, amikor a nyírófeszültség és a deformációsebesség közt lineáris a kapcsolat, newtoni folyadékról beszélünk, és a következő képlet érvényes:

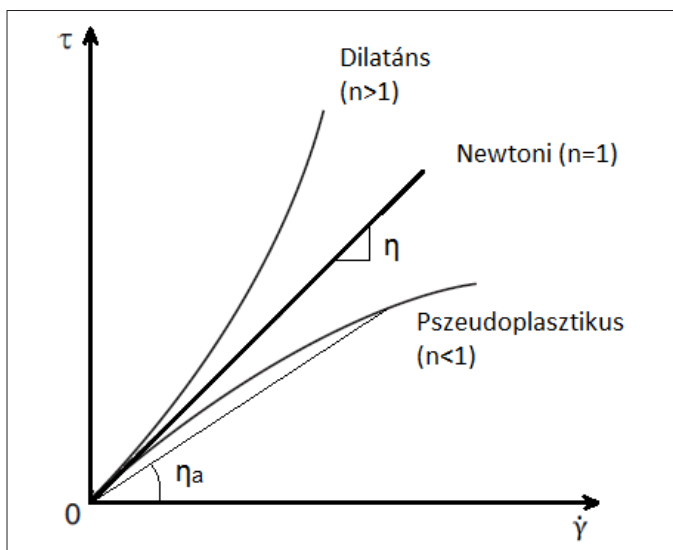
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Itt η a folyadék viszkozitása és az **1.1. ábrán** az egyenes iránytényezőjét jelöli.

A newtoni folyadék esetén tehát, a folyadék viszkozitása független a nyírási feszültségtől, illetve a deformációsebességtől. A nem newtoni folyadékok két-féle viselkedést mutathatnak: dilatáns vagy pszeudoplasztikus. Mindkét esetben a nyírófeszültség és deformációsebesség közti kapcsolat nem lineáris, így a viszkozitás sem lesz állandó. A dilatáns viselkedés esetén a deformációsebesség növelésével a viszkozitása növekszik, vagyis az anyag keményedik. A keményítő vizes oldata ezt a viselkedést követi: ha kis sebességgel deformáljuk, a viszkozitása kicsi, de ha nagy sebességgel alakítjuk, akkor olyannyira megnő a viszkozitása, hogy akár járni is lehet rajta. A műanyag ömledékek a pszeudoplasztikus viselkedést követik, vagyis a deformációsebesség és nyírófeszültség növelésével a viszkozitásuk csökken, könnyebben folynak, ami előnyös lehet például fröcsöntés esetén a komplikált szerszámüregek kitöltésekor.

A viszkozitás változása a feszültség és deformációsebesség függvényében megnehezíti a tárgyalást, ezért definiálnunk kell a látszólagos viszkozitás – jelölése: η_a – fogalmát.

A nemnewtoni folyadékoknál a feszültség és a deformációsebesség közti kapcsolat leírására számos matematikai modell létezik, melyek közül a *Ostwald de*



1.1. ábra. Feszültség-deformációsebesség kapcsolat különböző folyadékok esetén

Waele-féle vagy *hatványfüggvény* modell az egyik leggyakrabban használt:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1.2)$$

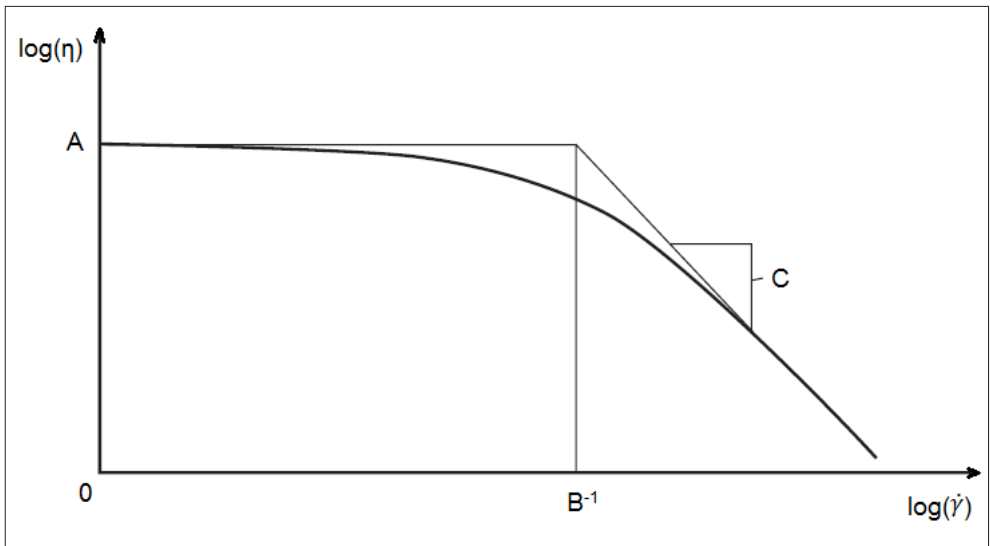
Itt K egy állagkoefficiens, és egy referenciaviszkozitásra utal, míg az n a folyási kitevő, amely változik a hőmérsékelt és a deformációsebesség függvényében. A polimerek többségében az $n < 1$. Minden polimer esetén az n és K állandók megtalálhatók a szakirodalomban.

A (1.2) egyenlet azonban nagyon kis és nagyon nagy igénybevételek esetén nem írja le megfelelően a nyírófeszültség és a deformációsebesség közti kapcsolatot. A gyakorlatban a *Carreau*-féle empirikus modellt is előszeretettel használják.

$$\tau = \frac{A \cdot \dot{\gamma}}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad (1.3)$$

Itt A , B és C anyagállandók, és empirikusan lehet meghatározni egy adott polimerre a $\log(\eta) = f(\log(\dot{\gamma}))$ grafikon megszerkesztésével.

A polimer ömledékek reális viselkedése mégis egy összetett függvénnyel jellemezhető, melyet struktúrvizkózus viselkedésnek neveznek. Ebben a modellben a nagyon kis és nagyon nagy igénybevételi tartományokban a polimer ömledék newtoni viselkedést mutat, míg ezek között, éppen a feldolgozási intervallumban, a hatványtörvénnyel írhatjuk le a viselkedést.



1.2. ábra. Az A , B és C anyagállandók meghatározási módja a Carreau-modellhez

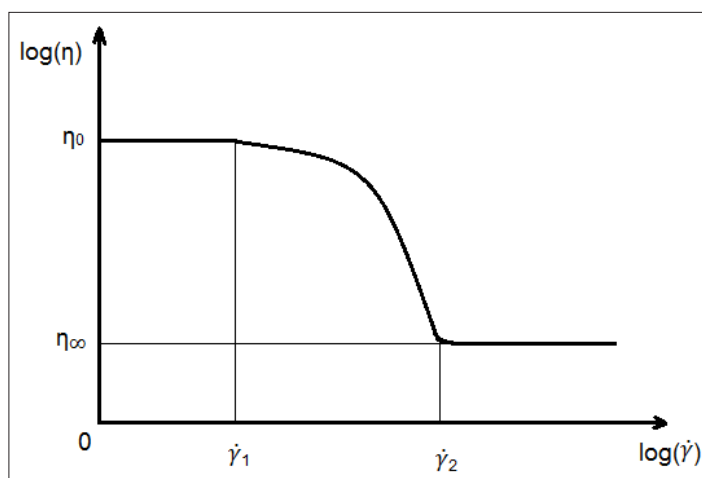
A struktúrvizkózus modell viszkozitásgörbéje, $\log(\eta) - \log(\dot{\gamma})$, az **1.3. ábrán** látható. Ebben az esetben jól érzékelhető, hogy a modell a $\dot{\gamma}_1 < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_2$ esetben a hatványtörvény, míg az ezen kívül eső tartományban a newtoni viselkedés írja le a viszkozitás viszonyát a deformációsebesség függvényében. Az η_0 értéket nulla deformációsebességi viszkozitásnak (angolul: zero shear rate viscosity) hívják, mivel ez a viszkozitás nulla vagy minimális deformációsebesség esetén jelentkezik.

A polimer ömledék viszkozitását a fentiekben tárgyalt feszültség és deformációsebesség mellett még befolyásolják a következők:

- hőmérséklet
- nyomás
- a használt polimer anyag molekulatömege.

A hőmérsékletnek jelentős a hatása az ömledék viszkozítására, melyet amorf anyagszerkezet esetén a William–Landel–Ferry- (WLF) függvény segítségével, míg részlegesen kristályos polimerek esetén egy Arrhenius-féle függvénnyel írhatunk le. Gyakorlatilag a hőmérséklet növekedésével a polimer ömledék viszkozitása csökken. A nyomásnak elhanyagolható a hatása az ömledék viszkozítására, míg a használt polimer molekulatömege jelentősen befolyásolja a viszkozitást.

A polimer ömledék viszkozitását reométerek segítségével mérik; a mérés eredményeként a **1.3. ábrán** látható viszkozitásgörbét meg lehet szerkeszteni, és ennek értelmében a polimer ömledék viselkedését egy adott hőmérsékleten



1.3. ábra. A struktúrvizkózus modell viszkozitásgörbéje

és molekulatömeg esetén pontosan meghatározhatjuk. Ez a görbe nyújtja a legpontosabb információt az adott ömledék folyási tulajdonságáról. Ennek felvétele viszont időigényes és drága művelet, bonyolult és drága berendezést igényel. Ennek köszönhetően az ipar egy alternatív megoldást talált a tömegre *vonatkoztatott folyási mutatószám* (angolul: Melt Mass-flow Rate, jele: MFR, régebbi elnevezés: Melt Flow Index, MFI) használatával. Az MFR-érték mérése gyors, egyszerű és a használt berendezés is olcsó. Az MFR-értéknek megfelelő viszkozitás tulajdonképpen egy pontja a **1.3. ábrán** látható viszkozitásgörbének, melyet nagyon kis deformációsebességen mérnek. Az MFR mérését közvetlenül a granulátummal el lehet végezni, nem szükséges szabványos próbatest előállítása. Továbbá az MFR-érték ismerete elégséges ahhoz, hogy a gyártástechnológiához szükséges változók értékét meg lehessen becsülni. Az MFR-értéket a kapilláris plasztométerrel mérik.

Az MFR-mérést az ISO 1133-1:2022 szabvány alapján kell elvégezni, amely anyagtól függően előírja a használt hőmérsékletet (100, 125, 150, 190, 200, 220, 230, 235, 240, 250, 260, 265, 275, 280 és 300 °C) és alkalmazott tömeget (0,325, 1,2, 2,16, 3,8, 5, 10 és 21,6 kg). Az MFR-mérés során a hőmérsékletre és nedvességre érzékeny polimereket az ISO 1113-2:2022 szabványban előírtak alapján kell kezelni. A mérés során a granulátumot a kapilláris plasztométer fűtött hengerébe helyezzük, és előmelegítjük terhelés nélkül. A kívánt előmelegítés után a szabvány által előírt tömeggel terheljük a megömlesztett polimert, és mérjük, hogy adott időintervallum alatt mennyi polimer anyag halad át a berendezés kapillárisán, amit levágunk. A kiáramlott polimer anyag tömegét lemérjük grammal kifejezve, és 10 percre vonatkoztatott értéket számítunk, így az MFR-érték mértékegysége g/(10 perc) lesz, és következésképpen számítható:

$$MFR = \frac{600 \cdot m}{t} \quad (1.4)$$

Az egyenletben m a levágott minták átlagos tömege grammal, t a két minta levágása közt eltelt idő másodpercben kifejezve.

A *térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószámot* (angolul: Melt Volume Rate, jele: MVR) is használják $\text{cm}^3/(\text{10 perc})$ mértékegységgel:

$$MVR = \frac{MFR}{\rho} \quad (1.5)$$

Itt ρ a polimer sűrűsége g/cm^3 -ben kifejezve.

A polimer folyási tulajdonságától függően a szabvány előír bizonyos vágási intervallumokat (**1.1. táblázat**), hiszen a kapilláris plasztométer térfogata nem feltétlenül képes befogadni annyi anyagot, amennyi 10 perc mérési ideig elegendő lenne.

1.1. táblázat. A mérési jellemzők az MFR- vagy MVR-értékének alapján

MFR (g/(10 perc)) MVR (cm ³ /(10 perc))	Minta mennyisége a hengerben (g)	Két vágás között eltelt idő (s)
> 0,1 de ≤ 0,15	3-tól 5-ig	240
> 0,15 de ≤ 0,4	3-tól 5-ig	120
> 0,4 de ≤ 1	4-től 6-ig	40
> 1 de ≤ 2	4-től 6-ig	20
> 2 de ≤ 5	4-től 8-ig	10
> 5	4-től 8-ig	5

A **1.2. táblázat**ban látható, hogy a fröccsöntés esetén az MFR-értékek nagyok, ami azt jelenti, hogy a polimer ömledék viszkozitása kicsi (vagyis könnyen folyik), ami előnyös a komplikált és kis falvastagságú termékek gyártása esetén. Ezzel ellentétben a profilkiszajtolás (extrúzió) esetén a polimer ömledék viszkozitása kisebb.

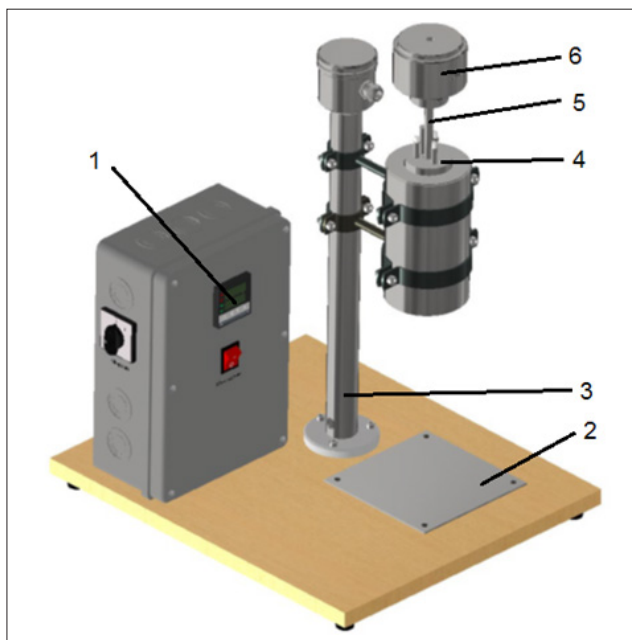
1.2. táblázat. Az egyes megmunkálási eljárásokra jellemző MFR-értékek

Megmunkálási eljárás	MFR (g/(10 perc))
Fröccsöntés	5–100
Rotációs öntés	5–20
Fóliaextrudálás (fóliafűvás)	0,5–6
Fröccsfűvás	0,1–1
Profilkiszajtolás (extrúzió)	0,1–1

1.2. Egyedi tervezésű kapilláris plasztométer

A **1.4. ábrán** látható egy egyedi tervezésű kapilláris plasztométer.

A berendezés elemei egy alaplapon helyezkednek el. A mérés elkezdéséhez az 1 hőmérséklet szabályzó segítségével beállítjuk a kívánt hőmérsékletet. A 4-es henger fűtését 3 darab, egyenként 200 W teljesítményű fűtőelem végzi. A hőmérséklet-szabályzáshoz K-típusú hőelem szolgáltatja a bemeneti jelet. A henger hőszigetelve van a pontosabb mérés érdekében. A kívánt hőmérséklet elérése után a 3-as tartóoszlopra rögzített 4-es hengerbe helyezzük a granulátu-



1.4. ábra. Egyedi tervezésű kapilláris plaztométer

mot, majd ezt előmelegítjük. Az előmelegítés után az 5-ös rudat és a 6-os terhelő tömeget a 4-es hengerbe helyezük. Ennek hatására a kapillárison kiáramlik a polimer ömledék, melyet a kívánt idő után levágunk, és a 2-es lapon hagyunk kihűlni. A méréshez több mintát gyűjtünk, majd ezeket lemérjük, és a tömeget átlagoljuk. Az (1.4)-es képlettel kiszámoljuk az MFR-értéket.

A kapilláris plaztométer esetében a terhelő testek fémkorongok. A terhelő testeket kézzel lehet az 5-ös rúdra helyezni. A terhelés szintenként épül fel a szabványban meghatározottak alapján, a terhelő testek kombinálásával, amiként ezt az 1.3. táblázat mutatja.

1.3. táblázat. A terhelési szintek felépítése.

Szint	Tömeg (kg)	Erő (N)	Felépítés
1.	0,325	3,187	Dugattyúrúd + dugattyúváll + 1. terhelő test
2.	1,2	11,77	0,325 kg + 0,875 kg (2. terhelő test)
3.	2,16	21,18	0,325 kg + 1,835 kg (3. terhelő test)
4.	3,8	37,26	0,325 kg + 3,475 kg (4. terhelő test)
5.	5	49,03	0,325 kg + 4,675 kg (5. terhelő test)
6.	10	98,07	0,325 kg + 5. terhelő test + 5 kg (6. terhelő test)

1.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- Az MFR mérése polipropilén (PP) – 230 °C, 2,16 kg, 5 perc előmelegítés – és polietilén (PE) – 190 °C, 2,16, 5 perc előmelegítés – esetén.
- A hőmérséklet hatásának vizsgálata a folyási tulajdonságokra PP esetén:
T = 210, 220, 240 és 250 °C-on, 2,16 kg terhelés és 5 perc előmelegítéssel.
Az $MFR = f(T)$ diagram szerkesztése.
- A terhelés hatásának vizsgálata a folyási tulajdonságokra PP esetén:
T = 230 °C, terhelés 0,325, 1,2, 2,16, 3,8 és 5 kg, valamint 5 perc előmelegítéssel. Az $MFR = f(\text{terhelés})$ diagram szerkesztése.

2. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT

A gyakorlat célja a hőre lágyuló műanyagok húzási tulajdonságainak megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található, egytengelyű (csak húzni és nyomni képes) szakítógép felépítésének megismerése.

2.1. Elméleti alapok

A szakítóvizsgálat során egy próbatest állandó sebességgel történő húzása hatására, a próbatestben megjelenő erőt mérjük, valamint a deformáció mértékét. Általában a vizsgálat végére a próbatest eltörik, elszakad. A mért erő és alakváltozás, valamint a próbatest méreteinek ismeretében anyagvizsgálati mérőszámokat lehet megállapítani. A szakítóvizsgálat közvetlen eredménye az erő-hosszúság változás diagramja. A mérnöki gyakorlatban a feszültségmegnyúlás-diagram is használatos.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

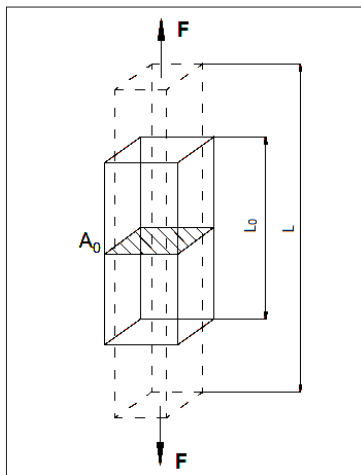
$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Itt σ (N/mm²) a mérnöki feszültség, F (N) a próbatestben deformáció hatására jelentkező erő, A_0 (mm²) a próbatest kiindulási keresztmetszete, melyre az F erő merőleges, ε (%) az alakváltozás, L (mm) a mérési jeltáv és L_0 (mm) a kezdeti jeltáv.

A hőre lágyuló (termoplasztikus) polimer anyagok szakítóvizsgálatát az ISO 527 nemzetközi szabványsorozat alapján végzik el.

A szakítóvizsgálat során viszonylag kicsi, de állandó vizsgálati sebességet használnak, illetve a próbatestet nem érheti sokszerű terhelés. Az állandó vizsgálati sebességet a szakítógép biztosítja.

A próbatest megnyúlása vagy deformációja több komponensre bontható, melyek abszolút értéke a vizsgált polimer anyag és a vizsgálati körülmények (hő-



2.1. ábra. Alakváltozás a szakítóvizsgálat során

mérséklet, nedvességtartalom és deformációsebesség) függvényében változik:

- rugalmas alakváltozás (elasztikus deformáció)
- lineáris viszkoelasztikus deformáció
- nemlineáris viszkoelasztikus deformáció
- képlékeny alakváltozás (plasztikus deformáció).

Az elasztikus deformáció nagyon kis mértékű, $\varepsilon < 0,1\%$, a termoplasztikus polimer anyagok esetén. A polimer láncot alkotó atomok közti távolság és az atomok közti szög változik meg, mely hatására a befektetett energia potenciális energia formájában halmozódik fel. Ezt a deformációt Hook törvénye írja le, amely értelmében a σ és ε közt lineáris kapcsolat áll fenn.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

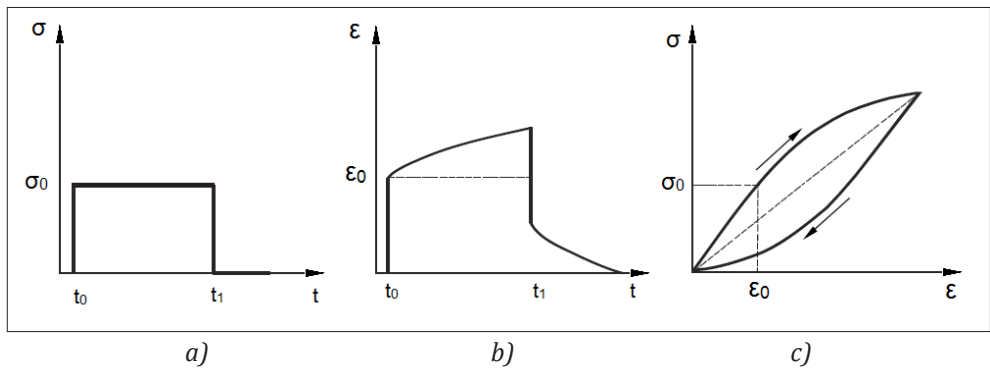
Az egyenletben E (N/mm²) a húzási rugalmassági modulus (Young-modulus).

Az elasztikus deformáció mértéke gumik és összetett (kompozit) anyagok esetében akár az $\varepsilon = 40\%$ -ot is elérheti. Az erőhatás megszűnésével a próbatest visszanyeri eredeti formáját és méretét.

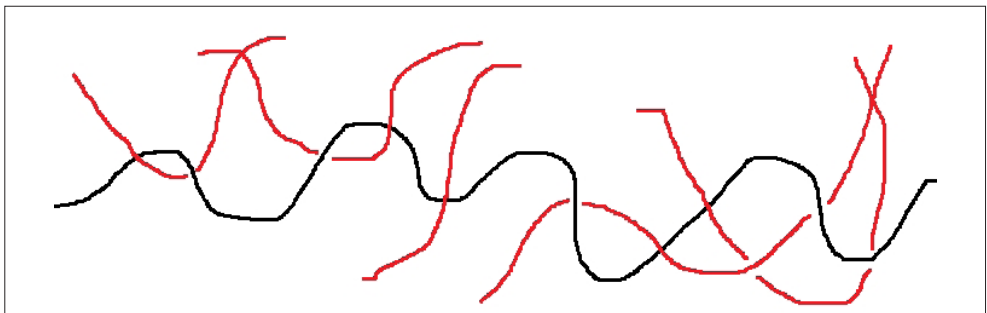
A lineáris-viszkoelasztikus deformáció esetén a próbatest szintén visszanyeri eredeti méretét a terhelés megszűnésével, viszont ez a folyamat már idő- és hőmérséklet-függő. Empirikus megfigyelések alapján a termoplasztikus polimer anyagok esetén a lineáris-viszkoelasztikus viselkedés 0,1% és 0,5% nyúlási intervallumba tehető. Molekuláris szinten a láncszakaszok az erő hatására átrendeződnek oly módon, hogy nem változik meg a láncszakaszok közti kapcsolat, vagyis az összefonódás (entanglement). A 2.2. ábra szemlélteti, hogy konstans

terhelés hatására a deformáció a kezdeti elasztikus válasz után, ε_0 , a terhelés növelése nélkül tovább növekszik. A terhelés megszűnésével, a t_1 pillanatban, a kezdeti ε_0 megnyúlási értékkel a deformáció csökken, majd az idő függvényében a próbatest visszanyeri eredeti méretét. A **2.2.c ábrán** a σ - ε grafikon szemlélteti a terhelési és a relaxációs folyamat közti különbséget, mely histerézis megjelenéséhez vezet. Ennek értelmében a ε_0 megnyúláshoz terhelés esetén egy adott feszültségérték tartozik, míg relaxáció esetén egy másik érték.

Nemlineáris viszkoelasztikus viselkedés akkor jelentkezik, mikor az alkalmazott terhelés egy bizonyos határt meghalad, minek hatására a polimer láncok közti összefonódás megváltozik. Ennek hatására mikrostrukturális károsodás keletkezik, mivel a polimer láncok mozgását már nem gátolja az összefonódás, így egy folyási folyamat veszi kezdetét, mely irreverzibilis deformációhoz vezet. A **2.3. ábrán** látható a polimer láncok összefonódása.



2.2. ábra. Lineáris viszkoelasztikus viselkedés
(a) konstans terhelés idő függvényében, b) a megnyúlás-válaszfüggvény,
c) fokozatos terhelés és relaxációs σ - ε görbék

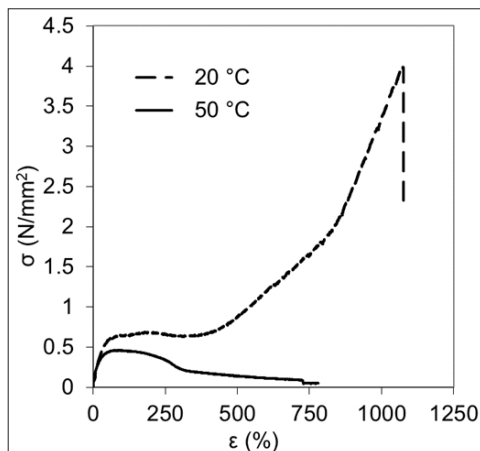


2.3. ábra. Egy polimer lánc, fekete, összefonódásának (entanglement) szemléltetése más polimer láncokkal

Plasztikus viselkedés a folyási pont után jelentkezik, ahol tulajdonképpen a polimer láncok mozgása folyamatos, ami további irreverzibilis alakváltozást eredményez. Ennek hatására a próbatest keresztmetszete lecsökken, amit kontrakciónak neveznek, illetve a kontrakció terjedését nyakképződésként tárgyalja a szakirodalom. Mivel a keresztmetszet számottevően csökken, a valódi feszültséget érdemes definiálni, hiszen a mérnöki feszültség esetén a kezdeti keresztmetszetet, A_0 , használjuk. A pillanatnyi erő és a pillanatnyi keresztmetszet aránya a valódi feszültséget adja. A mérnöki és a valódi feszültség közt jelentős különbség alakul ki, főleg az elasztomerek vagy a termoplasztikus elasztomerek esetén.

A szakítóvizsgálat esetén az eredményt több tényező is befolyásolhatja, melyek közül a vizsgálati sebesség, v , a hőmérséklet és a próbatest nedvességtartalma említhető meg. A vizsgálati sebesség standardizálása és ennek követése biztosítja, hogy az eredmények összehasonlíthatók legyenek. Általában, a vizsgálati sebesség növelésével a polimer anyagok rugalmassági modulusa és szakítószilárdsága növekszik, míg a szakadási nyúlás csökken. A polimer anyag nedvességtartalmának hatása a szakítóvizsgálatra csak a hidrofil anyagok, pl. PA, esetén jelentkezik. A hidrofil polimer anyagok a nedvességet akár a levegőből is felvehetik, melynek hatására a vízmolekulák beékelődnek a polimer láncszakaszok közé, így megnövelve a köztük lévő távolságot, természetesen a felvett vízmennyiség függvényében. Úgy is gondolhatunk erre a hatásra, ahogy a csúsztatóanyagok hatnak különböző polimer anyagok megmunkálási tulajdonságaira. A hőmérséklet hatása a polimer anyagok húzási tulajdonságára viszont jelentős. Ahogy közeledünk a mérési hőmérséklettel az adott anyagok T_g vagy T_m hőmérsékletéhez, a deformáció következtében az anyagban gerjedő feszültség kisebb, míg a megnyúlás növekszik. A **2.4. ábrán** poliizobutilénalapú, diblokk-szerkezetű, termoplasztikus elasztomer szakítógörbéje látható.

A poliizobutilén azon elasztomerek közé tartozik, mely húzás hatására kristályosodik. Ennek köszönhető, hogy 20 °C-on a szakítógörbén a feszültségérték meredeken növekszik a megnyúlás függvényében. A poliizobutilén kristályok olvadási hőmérséklete $T_{mPIB} = \sim 44$ °C. Így, ha a húzási vizsgálatot ennél nagyobb hőmérsékleten végezzük, például 50 °C, nem szabad, hogy a kristályok kialakuljanak. Következésképpen a kristályok által nyújtott erősítés elmarad, és nem látunk nagy ellenállást, húzófeszültséget az anyag részéről a deformáció hatására. Műanyagok esetén hasonló viselkedést figyelhetünk meg, vagyis a hőmérséklet emelkedésével a szakadáshoz szükséges feszültség csökken, és a megnyúlás növekszik.

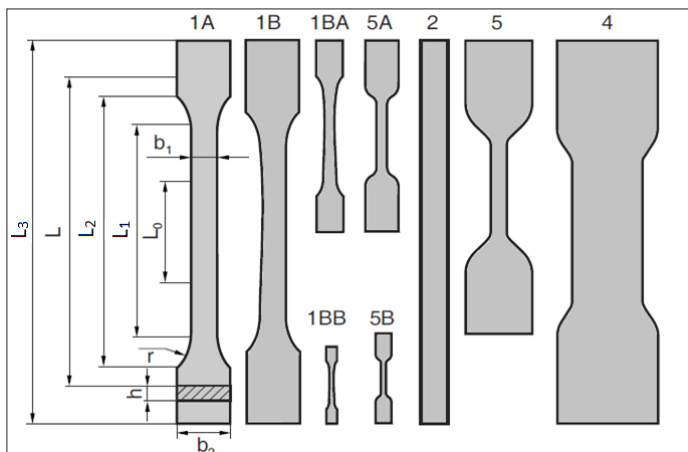


2.4. ábra. Poliizobutilén-alapú, termoplasztikus elasztomer szakítógörbéje 20 °C-on (szaggatott vonal) és 50 °C-on (folytonos vonal).

2.1.1. A próbatest

A polimer anyagok szakítóvizsgálatához – a fémektől eltérően – téglalap keresztmetszetű a próbatest. A szabvány pontosan meghatározza a standard próbatest méretét és formáját. A **2.5. ábrán** a standard próbatestek láthatók.

A szakítóvizsgálat során a próbatest terhelésekor kerülni kell az ütések vagy sokkszerű hatásokat. A próbatest alakjából és a vizsgálati körülményeknek köszönhetően a próbatest középső részén, a befogástól távol kialakul egy homogén húzófeszültségi zóna, melyben a feszültség a próbatest téglalap alakú keresztmetszetén egyenletesen oszlik el.



2.5. ábra. Az ISO 527 szabványsorozat szerinti próbatestek

Az 1A és 1B próbatestek megfelelnek az ISO 3167 szabványban megadott méreteknek, ezáltal különböző vizsgálatok elvégzésére alkalmasak, mint például a hajlítás, nyomás vagy ütővizsgálat. Az 1A-típust általában fröccsöntéssel állítják elő, míg az 1B-típust lemezekből vágják ki (például kompozit anyagok esetén). Az 1BA és 1BB kicsinyített változatai az 1B-típusnak, melyek 1:2, illetve 1:5 aránnyal kisebbek. Gumik és más elasztomer anyagok esetén az 5A és 5B típusú próbatestek használatosak, melyek az ISO 37-ben megjelölt 2-es és 4-es próbatestnek felelnek meg. A 2 és 4 típusú próbatesteket fóliák és lemezek vizsgálatára (a vastagság kisebb, mint 1 mm) használják, ezek közül is a 2-es típus használata az elterjedtebb egyszerű előállításuknak köszönhetően. A 4-es típust minőség-ellenőrzési célokra használják, speciális befogó szerkezetekkel. Az 5-ös típusú próbatest nagyon képlékeny anyagok esetén használatos, melyek nagy nyúlási értékek esetén szakadnak el.

2.1.2. A meghatározható mechanikai jellemzők

A műanyagok szakítóvizsgálati tulajdonságainak meghatározására két protokollt különböztethetünk meg:

1) A rugalmassági tulajdonságok, főként az E meghatározása. A vizsgálati sebesség, $v = 1 \text{ mm/min}$, a deformációt 50 mm távolságon mérik.

2) A húzási igénybevétellel szemben tanúsított erő és deformáció mérését nagyobb vizsgálati sebességgel, általában 50 mm/min , végzik. Gumik és egyes termoplasztikus elasztomerek esetében a vizsgálati sebesség 500 mm/min .

A rugalmassági modulus, E , tulajdonképpen az anyag rugalmasságára és merevségére nyújt rálátást: ha a szakítógörbe kezdeti szakaszán a görbe iránytényezője nagy, vagyis meredek a görbe, akkor merev anyagról beszélünk, illetve, ha az iránytényező kicsi, akkor kevésbé merev, lágy anyagot feltételez. Ennek értelmében az E meghatározása kritikus.

A rugalmassági modulus, annak az érintő egyenesnek az iránytényezője, melyet a σ - ε szakítási görbe zéruspontjából a görbéhez szerkesztünk. Azonban ez a módszer nagy hibalehetőséget hordoz magában, mivel a műanyagok csak kis-mértékű rugalmas alakváltozásra képesek, így ezt a gyakorlatban nem használják.

A rugalmassági modulus (E_h) a szakítógörbe két pontja által meghatározott egyenes iránytényezője. A szabvány pontosan definiálja ezt a két pontot: a 0,05 és 0,25% megnyúlási értékek, illetve a hozzájuk tartozó feszültségek ($\sigma_{0,05}$ és $\sigma_{0,25}$) által. Ennek értelmében a húrmodulust a következőképpen lehet meghatározni:

$$E_h = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}}{0,0025 - 0,0005} = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}}{0,002} \quad (2.4)$$

A **2.6. ábrán** figyelhető meg a polimer anyagokra jellemző szakítógörbék. A kinyerhető információk a görbék karakterisztikus pontjaira jellemzők. A mérnöki feszültség és a nyúlás fogalmát a (2.1) és (2.2) képletekkel definiáltuk, melyekkel anyagjellemzőket kapunk meg, mivel a próbatest méreteire vannak vonatkoztatva.

A szilárdság, másként húzószilárdság (angolul: strength), σ_m , a vizsgálat alatt mért első, lokálisan maximális erő és a kezdeti keresztmetszet aránya. A húzószilárdság megegyezhet a folyási feszültséggel („c” görbe) vagy a szakadási szilárdsággal (a „c” görbe kivételével minden görbe)

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (2.5)$$

Szakadási szilárdság (angolul: stress at break), σ_b , próbatest szakadása előtt mért legmagasabb erő és a kezdeti keresztmetszet aránya. Önmagában a szakadási szilárdsági értékek nem használatosak, mivel a mérési körülmények, a berendezés pontossága, a mintavételezés sűrűsége befolyásolják nagyban ezt a feszültségértéket.

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (2.6)$$

A folyási feszültség (folyáshatár), σ_y , az első feszültségérték, amelynél a nyúlás növekszik a feszültség növekedése nélkül. A polimerek esetében, eltérően a fémektől, a nemlineáris viszkoelasztikus viselkedés a folyási feszültség előtt elkezdődik, tehát a polimer láncszakaszok egymáshoz viszonyítva elmozdulnak, ami maradó alakváltozást eredményez. Ennek értelmében a folyás a polimer anyagok esetén a folyási feszültség előtt elkezdődik, vagyis nem beszélhetünk folyáshatárról, mint a fémek esetén.

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad (2.7)$$

A σ_x feszültség x% nyúlásnál, tulajdonképpen az a feszültségérték, amely egy adott nyúlási értékhez tartozik. Az elasztomerek és gumik vizsgálata esetén alkalmazzák általában, ahol a feszültséget meghatározzák 100, 200 és 300% nyúlás esetén.

A szakítóvizsgálat során a fontosabb feszültségértékekhez alakváltozási, nyúlási értékek is társulnak.

A szilárdsághoz rendelhető a szilárdsági nyúlás, ε_m , mely értéke a következő képlettel számolható:

$$\varepsilon_m = \frac{L_m - L_0}{L_0} \quad (2.8)$$

ahol az L_0 a próbatest vizsgált szakaszának terhelés előtti hossza, míg L_m a próbatest vizsgált szakaszának hossza a maximális erőértéknél.

A szakadási nyúlás, ε_b , a próbatest szakadásakor mért távolság, L_b , viszony az L_0 -hoz.

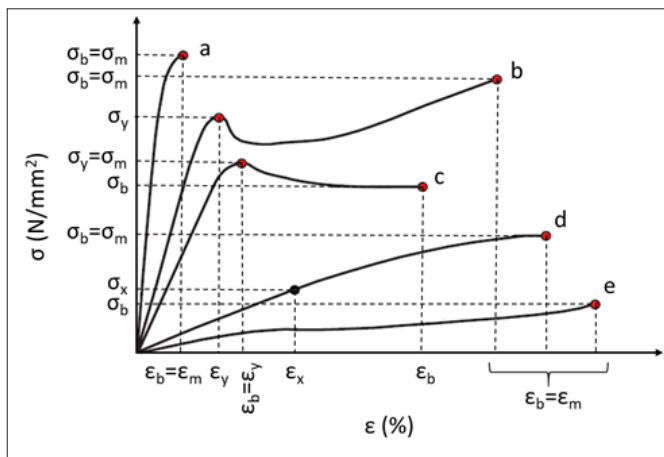
$$\varepsilon_b = \frac{L_b - L_0}{L_0} \quad (2.9)$$

A folyási nyúlás, ε_y , a folyási feszültséghez rendelhető nyúlási érték.

A törési munka, $W_B(J)$, az $F-\Delta L$ görbe alatti területtel egyenlő, melyet a következő képlettel számolhatunk ki:

$$W_B = \int_0^{\Delta L} F dL \quad (2.10)$$

Az „a”-val jelölt görbe egy erős, törékeny anyagra jellemző, melynek a szilárdsági nyúlása kicsi, rugalmassági modulusa nagy, és nagy a szilárdsága. A „b”, „c” és „d” görbék képlékeny anyagra jellemzők, melyek esetén a nyúlási értékek el-



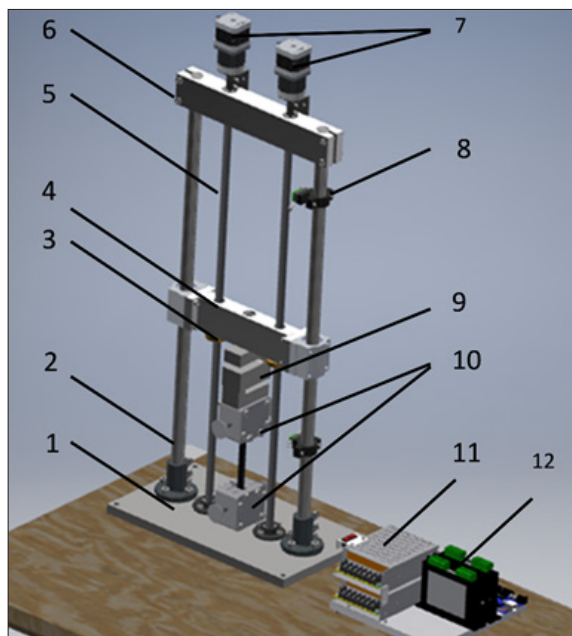
2.6. ábra. Polimer anyagokra jellemző szakítógörbék

érhetik a több 100%-ot is. A „b” és „c” esetben folyási feszültség jelenik meg, melyek közül a b esetben egy keményedési viselkedés figyelhető meg, míg a „c” esetben ez elmarad. A folyási feszültség megjelenése nyakképződéshez vezet. Az „e” görbe az elasztomerekre jellemző viselkedést mutat, mely szakadási nyúlása az 1000%-ot is meghaladhatja.

2.2. Egyedi tervezésű, egytengelyű szakítógép

A 2.7. ábrán egy egyedi tervezésű szakítóberendezés látható. A berendezés, működési elvét és felépítését tekintve, hasonlít a kereskedelemben fellelhető szakítógépekhez, viszont a költséghatékony tervezést figyelembe véve teljesen egyedi tervezésű. A berendezés maximális terhelhetősége $F_{max} = 6500$ N, míg vizsgálati sebesség $v = 0-110$ mm/min határok között változtatható. A berendezés három fő egységre bontható: a mechanikai egység, a vezérlőegység és a felhasználói felület.

A mechanikai egység a 2.7. ábrán látható elemek összessége. A berendezés vázát az 1-es alaplap, 2 darab, 2-essel jelölt, megvezető oszlop és a 6-os elem alkotja. A próbatest deformációját a 4-es keresztfej lineáris mozgása biztosítja. A lineáris, uniaxiális mozgása a 4-es keresztfejnek az 5-ös trapézmenetesorsó- és 3-as csavaranya-mechanizmussal valósul meg, mely a 7-es fordulat-

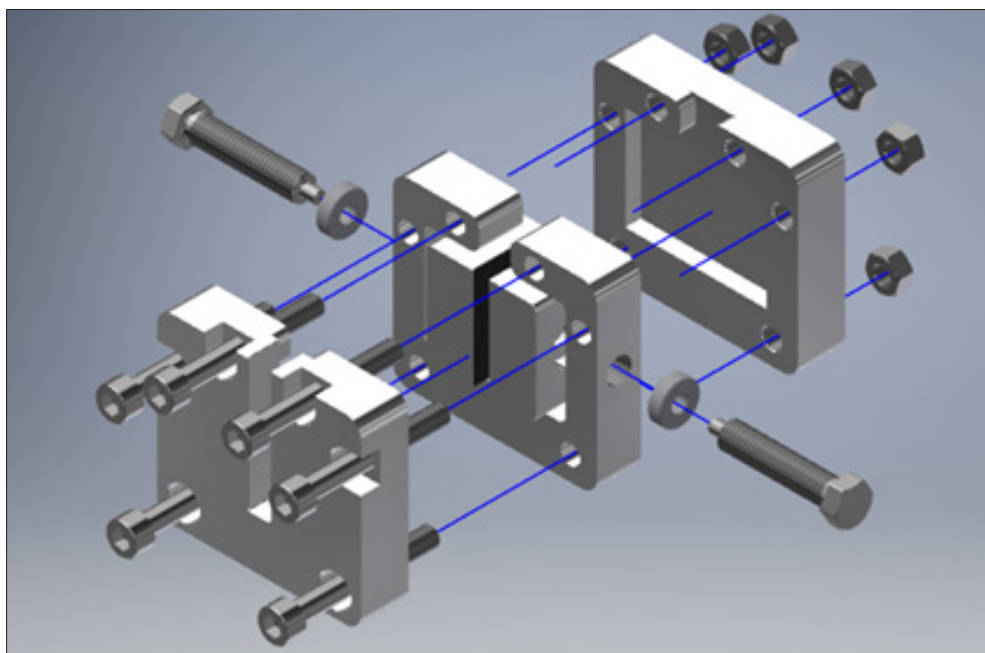


2.7. ábra. Egyedi tervezésű szakítóberendezés 3D-s modellje

szám-csökkentővel ellátott léptetőmotorok forgómozgását alakítja át. A berendezés biztonságos határok között történő működését végálláskapcsolók, 8-as, biztosítják. A vizsgálat során keletkező erő mérését 10 kN-os erőmérő cella szavatolja, míg a deformáció mértékét a berendezés egyedi extenzométer használatával valósítja meg.

A próbatestet a 10-essel jelölt befogóegységek segítségével rögzítjük, melyek részletes felépítése a **2.8. ábrán** tekinthető meg.

A berendezés vezérlése egy Arduino mikrovezérlőre épül. A mérés kezdete előtt ki kell választani a vizsgálati sebességet, melyet az Arduino mikrokontroller feldolgoz, és a léptetőmotorok felé kommunikál a digitális léptetőmotor-vezérlők, 12-es, segítségével. A léptetőmotorok tápfeszültségét a 11-es tápok szolgáltatják. Az erőmérő cella a mérés során fellépő erőhatásra egy jelet generál, melyet erősíteni kell egy analóg erősítővel, mielőtt ezt az Arduino fel tudná dolgozni. Az extenzométer a megtett út függvényében szintén generál egy jelet, melyet a mikrovezérlő dolgoz fel. Az Arduino az erő és a megtett út feldolgozott jeleit továbbítja a számítógépen futó felhasználói programnak, mely a számítógép képernyőjén valós időben kirajzolja ezeket diagram formájában. A mérési eredmények elmentése lehetséges.



2.8. ábra. A befogószerkezet összeszerelésének robbantott ábrás nézete

2.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- Polietilén (LDPE) próbatestek fröccsöntése $T = 270\text{ °C}$, $p = 8\text{ bar}$, utónyomási idő $t = 3\text{ s}$ fröccsöntési paraméterekkel.
- A szakítóvizsgálatokhoz az ISO 527 szabványsorozat szerinti, 1BA próbatestet használjuk, 57 mm befogási hosszal.
- Minden vizsgálati sebességen legalább 5 mérés elvégzése szükséges. A szabvány szerint egy mérés akkor használható fel, ha a próbatest az elvékonyodott részen szakad el.
- A vizsgálati sebesség hatásának tanulmányozása a húzószilárdságra és a szakadási nyúlásra, $v = 10, 30, 50, 70, 90, 100\text{ mm/min}$ esetén. Minden vizsgálati sebesség esetén legalább 5 mérést végzünk.
- Az E - v és σ_m - v diagramok megszerkesztése szükséges.

3. CHARPY-FÉLE ÜTŐVIZSGÁLAT

A gyakorlat célja a hőre lágyuló műanyagok szívósságának, dinamikus terhelési tulajdonságainak megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található Charpy-féle ingás ütőmű felépítésének megismerése, mely a fajlagos ütmunka mérésére alkalmas.

3.1. Elméleti alapok

A szakítóvizsgálat segítségével az anyag statikus (a mérés folyamán a próbatest lassan van terhelve) terhelésre adott válaszát határozzuk meg, ami elengedhetetlen egy termék tervezése kapcsán. A termék használatánál viszont dinamikus igénybevételek is megjelennek, melyeket a tervezés során szintén figyelembe kell venni. Körülmények, melyek esetén dinamikus igénybevétel léphet fel a használt alkatrészben: közlekedési balesetek, vízalatti alkalmazások, jégeső, kő vagy egyéb testek közlekedési eszközökkel való ütközése, védősisakok és -falak használata közben.

Az anyagok dinamikus igénybevétellel, ütéssel szemben tanúsított viselkedését, ellenállását, energiaelnyelő képességét szívósságnak nevezzük. Az ütővizsgálat során a Charpy-féle ütőszilárdságot határozzuk meg, mely megmutatja, mennyi energia szükséges a töréséhez, felületegységre vonatkoztatva.

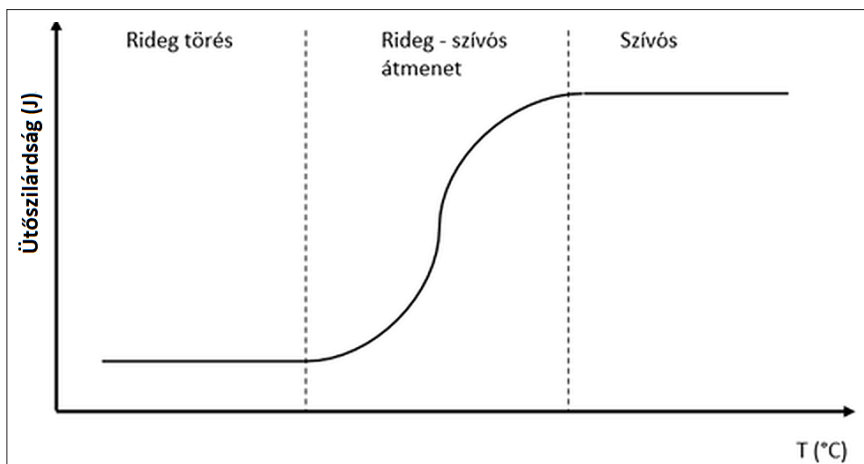
Dinamikus igénybevétel esetén a deformációsebesség nagymértékű, így az anyag teljesen más viselkedést mutat, mint a statikus vagy kvázistatikus igénybevétel során. A polimer anyagok ütésre tanúsított viselkedését a hőmérséklet és a termékben kialakult belső feszültségi állapot is befolyásolja.

A polimer anyagoknak, szerkezetüktől függően, egy vagy két karakterisztikus hőmérsékleti értékük van, nevezetesen: az üvegesedési hőmérséklet, T_g , az amorf anyagszerkezet esetén, valamint az olvadási hőmérséklet, T_m , a kristályos anyagszerkezet esetén. Általánosan kijelenthető, hogy a hőmérsékletnek nagy hatása van a polimer anyag szívósságára, hiszen a hőmérséklet meghatározza a polimer láncok mobilitását, mozgékonyágát. Amennyiben a polimer

láncszakaszok mobilitása nagy (amorf anyagszerkezetnél a $T > T_g$ és kristályos anyagszerkezetnél $T > T_m$), a polimer anyag rugalmas fizikai állapotban van; így a láncok, mozgás által, energiát tudnak elnyelni, ami megakadályozhatja a törés megjelenését.

A **3.1. ábra** mutatja a Charpy-féle ütőszilárdság változását a hőmérséklet függvényében. Rideg törés esetén a törési szilárdság kicsi, míg szívós törés esetén nagy. Vagyis rideg törésnél a polimer anyag kevés energiát nyel el, hiszen a polimer láncszakaszok mobilitása kicsi. Ezzel szemben szívós törés esetén nagy energiaelnyelés történik, amit a polimer láncok mozgása valósít meg. A törési felületet megvizsgálva a rideg törés esetén finom, sima felület marad, és nem figyelhető meg alakváltozás, míg a szívós törés durva felületet produkál, és megfigyelhető a kontrakció, a próbatest keresztmetszetének csökkenése.

A polimer termékek gyártása során nagy figyelmet kell fordítani a megfelelő technológiai tényezők meghatározására, ellenkező esetben a termékekben belső feszültségek jelennek meg. A termoplasztikus polimer anyagok forgácsolását leszámítva, minden feldolgozási technika (pl. fröccsöntés, kisajtolás (extrúzió), termofomázás (hőformázás) stb.) hőt és nyomást használ az alakadáshoz. Amennyiben a gyártás közben a hőmérséklet és/vagy a nyomás eloszlása nem egyenletes, a termékekben belső feszültségek jelennek meg. A belső feszültség tulajdonképpen a terméket egy „előfeszített” állapotba hozza, így a tönkremenetel kisebb terhelési hatására megy végbe. A termék felületén kialakított rovátkák, bemetszések, sarkos kialakítások feszültséggyűjtő helyek, így az ütővizsgálatot bemetszett próbatesteken is ajánlott elvégezni.



3.1. ábra. A Charpy-féle ütőszilárdság változása a hőmérséklet függvényében

A hőre lágyuló polimerek ütőmunkájának mérésére a Charpy-féle ingás ütőmű a legelterjedtebb. Ebben az esetben a próbatest két helyen van megtámasztva, és a bemetszéssel ellenkező oldalon terhelve (3.2a. ábra). A próbatest lehet bemetszett vagy bemetszés nélküli. A mérés menetét az ISO 179 szabvány szabályozza. A próbatest méreteit a 3.2b. ábra mutatja. A próbatest teljes hossza 80 mm, míg a megtámasztási távolság 62 mm. Az ütőmunkát nagyban befolyásolja a bemetszés sugara: minél kisebb a sugár, annál kisebb az ütőmunka.

Az energiát a (3.1) képlettel számolhatjuk, melynek magyarázata a 3.3. ábrán látható.

$$W_c = W_1 - W_2 = m \cdot g \cdot l(h_1 - h_2) = m \cdot g \cdot l(\cos\beta - \cos\alpha) \quad (3.1)$$

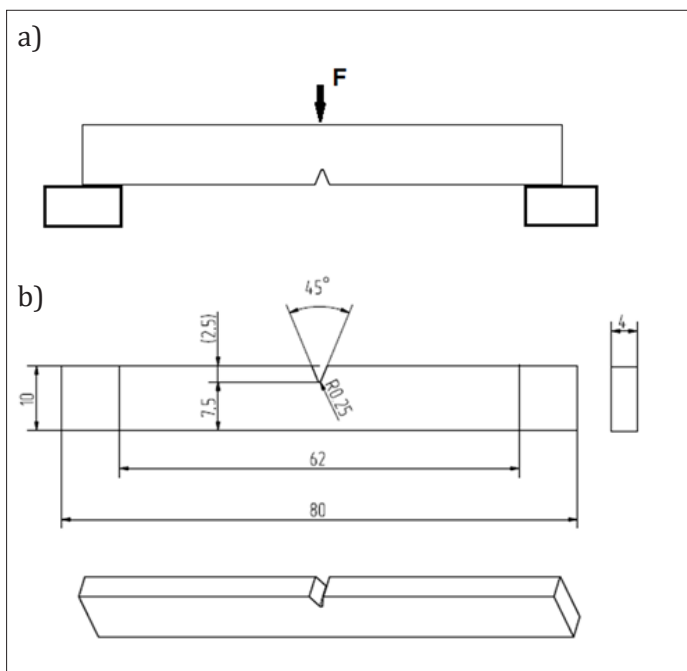
ahol:

W_c – a próbatest töréséhez szükséges energia (J)

W_1 – az inga kezdeti helyzeti energiája (J)

W_2 – az inga törés utáni helyzeti energiája (J)

h_1 – a kalapács tömegközéppontjának kezdeti magassága, a legalsó ponthoz képest (m)



3.2. ábra. a) A próbatest megtámasztása és terhelése a Charpy-féle ütőmű esetén, b) a bemetszett próbatest méretei

h_2 – a kalapács tömegközéppontjának törés utáni magassága, a legalsó pont-hoz képest (m)

l – az inga hossza (m)

g – gravitációs gyorsulás (m/s^2)

α – kezdeti szög

β – törés utáni szög

A Charpy-féle ütőszilárdságot megkapjuk, ha a W_c energiát elosztjuk a kezdeti keresztmetszettel, vagyis:

$$a_{cU} = \frac{W_c}{b \cdot h} \quad (3.2)$$

$$a_{cN} = \frac{W_c}{b_N \cdot h} \quad (3.3)$$

ahol:

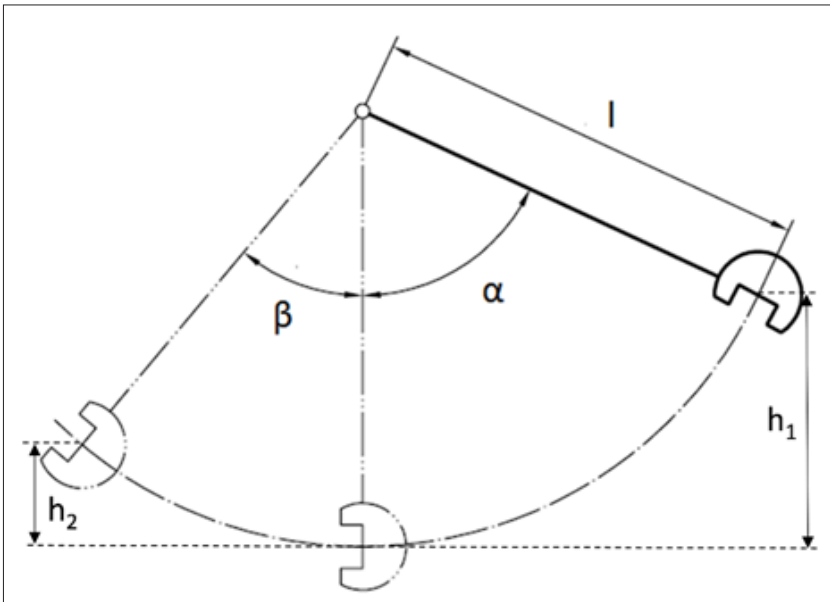
a_{cU} – a bemetszés nélküli próbatesten mért ütőszilárdság (J/m^2)

a_{cN} – a bemetszett próbatesten mért ütőszilárdság (J/m^2)

b – a bemetszés nélküli próbatest szélessége

b_N – a próbatest szélessége a bemetszésnél

h – a próbatest vastagsága.

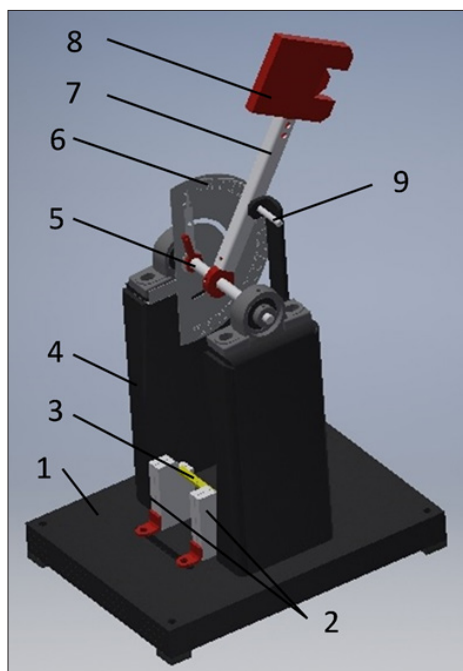


3.3. ábra. A töréshez szükséges energia számításához szükséges paraméterek magyarázata

3.2. Egyedi tervezésű Charpy-féle ingás ütőmű

A 3.4. ábrán egy egyedi tervezésű, Charpy-féle ingás ütőmű látható. A berendezés figyelembe veszi az ISO 13802 szabványban rögzített előírásokat, illetve követi a költséghatékony kivitelezést. A kritériumok közt többek között szerepel a kalapács geometriája, valamint az egyes elemek egymáshoz viszonyított helyzetének pontos tűrése, illetve a merőlegességre és a játékra vonatkozó megkötések. A kalapács helyzete a próbatesthez viszonyítva és sebessége különösen fontos a tervezés során.

A tervezési folyamat bemeneti paramétereként a kalapács tömege, mely $m = 1,3833 \text{ kg}$, és az inga hossza a forgástengelytől számítva a kalapács tömegközéppontjáig $l = 0,271 \text{ m}$. A berendezés egyes alkatrészei az 1-es alaplaphoz és az erre hegesztéssel rögzített 4-es lábakra csatlakoznak. A 7-es inga egyik végére a 8-as, egyedi geometriájú kalapács csatlakozik csavarkötésekkel, míg másik végére az 5-ös forgástengely kapcsolódik, mely csapágyakkal a 4-es lábakhoz van rögzítve. Az inga mérés előtti pozicionálását $\alpha = 150^\circ$ -on a 9-es elem biztosítja, mely az ingán kialakított furatba csúsztatható. A 9-es elem tengelye menti elmozdítással az ingát mozgásba hozzuk, melynek a kimozdulását, β , a próba-



3.4. ábra. Egyedi tervezésű Charpy-féle ingás ütőmű

testtel való ütközés után a 6-os skálázott elemen olvashatjuk le. A 3-as próbatest pozicionálását és megtámasztását a vizsgálat során a 2-essel jelölt elemek biztosítják, melyek pozíciója változtatható, amennyiben a szabványtól eltérő kisebb próbatest mérése szükséges.

Az ütőszilárdság-vizsgálathoz a próbatesteket fröccsöntéssel állítjuk elő, a **9.1. ábrán** látható fröccsöntőberendezés használatával.

3.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- Polisztirol és polipropilén (PS, PP) és újrahasznosított PP, bemetszett próbatestek fröccsöntése $T = 270\text{ °C}$, $p = 8\text{ bar}$, utónyomási idő $t = 3\text{ s}$ fröccsöntési paraméterekkel.
- A Charpy-féle ütőszilárdság mérése az említett polimer anyagokra.
- A hőmérséklet hatásának vizsgálata PS esetén az ütőszilárdságra: $T = -18\text{ °C}$, -4 °C , 22 °C és 50 °C .
- A mért és számított adatokat táblázatokba gyűjtjük, és grafikonok segítségével ($a_{cN} = f(T)$, oszlopgrafikon: a_{cN} -PP, újrahasznosított PP) ábrázoljuk, majd következtetéseket vonunk le a hőmérséklet és az újrahasznosítási folyamat hatásáról az ütőszilárdságra.

4. KEMÉNYSÉGMÉRÉS

A gyakorlat célja a polimer anyagok keménységére vonatkozó jelenségek megismerése és tanulmányozása. Továbbá cél a laboratóriumban található, *Shore A* és *D* keménység mérésére alkalmas berendezés felépítésének megismerése.

4.1. Elméleti alapok

A polimer anyagok keménysége fontos fizikai tulajdonság, mely befolyásolhatja a polimerek alkalmazási lehetőségeit. Például, általánosan beszélve, kopató igénybevétellel járó alkalmazásokban kemény anyagokat használunk. Egy szilárd halmazállapotú anyag keménysége alatt azt értjük, hogy mennyire áll ellen egy behatolótest által okozott benyomódásnak. A kemény, termoplasztikus anyagok nagy ellenállást tanúsítanak, vagyis nem vagy alig marad jele a mérésnek a felszínen, míg a lágy termoplasztikus anyagok esetében a benyomódás jelentősebb. Az elasztomer anyagok, mivel rugalmasak, nem követik a fenti viselkedést, így ezeknél a keménység mérése is másként történik.

A polimer anyagok keménységmérésére alkalmas módszerek a fémekre használt módszerekhez hasonlóak. Így a keménység mérésére több módszer is elterjedt, melyek lényege a vizsgált test felületén egy bemélyedés létrehozása, egy meghatározott geometriájú behatolótestet használva. A terhelést a vizsgált felületre merőlegesen kell alkalmazni. Annak függvényében, hogy a keménység mérése a lenyomat alapján történik, vagy a terhelés idejéhez kötött, megkülönböztethetünk statikus, illetve dinamikus keménységmérést.

Statikus keménységmérés esetén a behatolótestre ható erő lassan növekszik, majd egy maximum elérése után megszűnik. A behatolótest hatására egy lenyomat keletkezik a vizsgált anyag felületén, melynek méreteit vizsgálva lehet meghatározni a keménységet. A statikus terhelési módszerekhez tartoznak a Brinell-, Vickers-, Rockwell- és Knoop-keménységmérés.

A dinamikus vizsgálat során a behatolótestre ható erő gyorsan hat, majd a maximum elérése után adott ideig kell terhelni a vizsgált anyagot. Az erő hatá-

sára a behatolótest belenyomódik a vizsgált felületbe és a benyomódás mértéke alapján határozhatjuk meg a keménységet. Az elastikus anyagok, rugalmas műanyagok vagy elastomerek, esetén alkalmazzák a dinamikus keménységmérést. A dinamikus keménységméréshez tartozik többek között a *Shore*-típusú mérés.

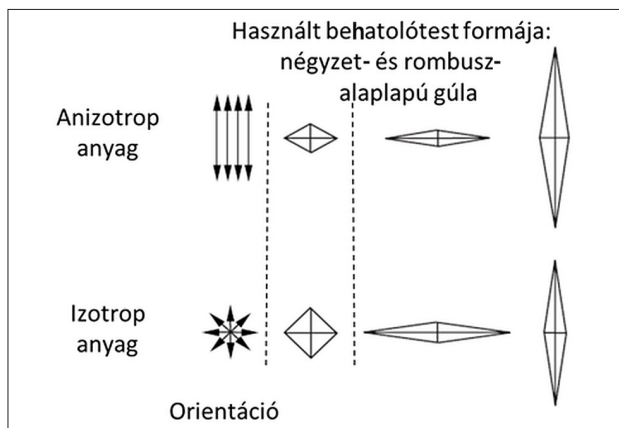
A keménységmérésre a következő tényezők hatnak:

- hőmérséklet
- az erőhatás gyorsasága
- a terhelés ideje és
- a terhelés nagysága.

A fenti tényezők a polimer anyagok viszkoelasztikus tulajdonságait befolyásolják, ennek értelmében a hőmérséklet hatására a polimer láncszakaszok mobilitása megnő, így könnyebben deformálódnak; ettől az anyag keménysége csökken. Az erőhatás gyorsaságának szerepe szintén a polimer láncszakaszok mobilitására vezethető vissza, hiszen, ha lassú a terhelés, a polimer láncszakaszoknak van „idejük” elhelyezkedni, és az erőhatásra jelentősen deformálódik az anyag, ami lecsökkent keménységként észlelhető. Mivel a viszkoelasztikus viselkedés az időtől függ, ezért elmondható, hogy hosszabb terhelés esetén a keménységérték csökken.

A fentiek mellett meg kell említeni a vizsgált anyag feldolgozása esetén megjelenő belső feszültséget és a tárolási feltételeket. Ezek hatása a keménységre általában csekély, viszont szélsőséges esetekben nagyon is befolyásolják azt. A természetes gumi, kaucsuk, kristályos fázisának olvadási hőmérséklete $T_m \approx 35^\circ\text{C}$, így, ha a tárolás szobahőmérsékleten történik, a gumiban kialakul a kristályos fázis, és megkeményedik, ami természetesen a feldolgozás szempontjából nem kívánatos. Ennek elkerülése érdekében a természetes gumit 40°C fölött érdemes tárolni megmunkálás előtt.

A keménységmérési eljárások abban különböznek egymástól, hogy más geometriájú behatolótestet használnak, illetve a terhelés nagysága és alkalmazása változik. Így létezik gömb alakú vagy négyzet-, illetve rombuszalaplapú gúlák, valamint kúp alakú behatolótestek. Nagyon fontos szerepe van a rombuszalaplapú gúlák alkalmazásának az anizotróp, hosszú szákkal erősített anyagok esetén, hiszen így az erősítőszálak által bevezetett anizotrópiát tanulmányozhatjuk a kompozitkeménységre nézve. A **4.1. ábrán** látható a négyzet- és a rombuszalaplapú gúla behatolótest lenyomata izotróp és anizotróp anyagra. Látható, hogy a négyzetalaplapú gúla behatolótest esetén, a szimmetriájából adódóan, a be-



4.1. ábra. Az anizotrópia hatása a keménységre

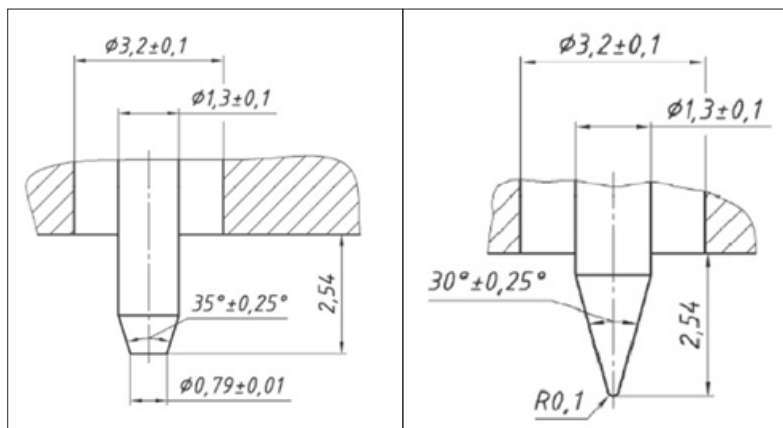
hatolótest és az orientáció relatív helyzete nem változtat a lenyomat formáján, vagyis a két átló közt egy kis méretbeni különbséget kapunk. Ezzel szemben, ha a rombuszalaplapú gúla behatolótestet használjuk, a különbség egyértelmű: a fej helyzete az orientáció irányára merőlegesen kisméretű lenyomatot (nagy keménység) eredményez, míg azzal párhuzamosan nagyméretű lenyomat (kis keménység) keletkezik.

4.1.1. Shore-keménységmérés

A Shore-keménységmérés dinamikus mérési technika. Ennek értelmében a terhelőerő gyorsan felépül, és a mérést a terhelés alatt kell elvégezni. Összesen 12 féle Shore-keménységmérés létezik, annak függvényében, hogy a terhelő elemnek milyen a geometriája. A polimer anyagok keménységi vizsgálatára a Shore A és a Shore D módszerek terjedtek el. A Shore A-t az elasztomerek, gumik és lágyabb műanyagok esetén alkalmazzák, míg a Shore D-t a keményebb műanyagok esetén. Az egyes méréstípusokhoz a benyomódó fej alakja nagyon fontos; erre példát a Shore A és D esetén a 4.2 ábra mutat.

Mivel a Shore A a lágyabb anyagok vizsgálatára alkalmas, a behatolótest alakja egy csonka kúp, annak érdekében, hogy ne keletkezzen kár a mintában, és hogy ne tudjon túl mélyre hatolni a szerszám. A Shore D behatolótest esetében a kúpos kialakítás egy 0,1 mm sugarú lekerekítést kapott. Ebben az esetben a szerszám jobban be tud hatolni a felületbe; így ez az eljárás keményebb műanyagok esetén használatos.

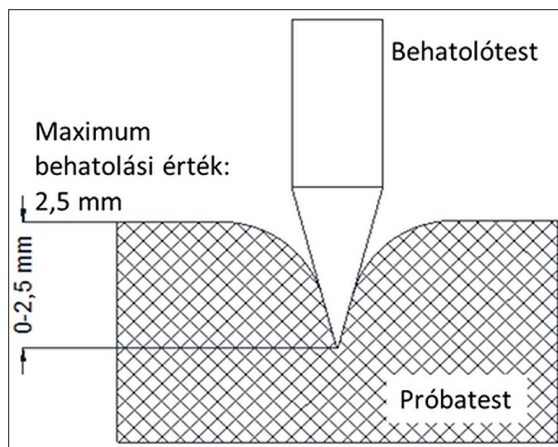
A Shore-keménységmérést kézi eszközzel is el lehet végezni, viszont ez a módszer magában hordozza a hiba lehetőségét, amennyiben a terhelés nem ponto-



4.2. ábra. A Shore A és D mérő behatolótest geometriai méretei

san merőlegesen történik a minta felületére. Pontosabb mérést lehet végezni állványos szerkezet használatával.

Minden Shore-keménységmérés esetén a behatolótest bemélyedését kell mérni (**4.3. ábra**). A keménységi érték egy 0–100 intervallumba helyezkedő érték, és a nagyobb szám keményebb anyagra értendő. A maximális bemélyedési távolság 2,5 mm. A bemélyedés mértéke fordítottan arányos a keménységgel, vagyis a 0 mm bemélyedés 100-as Shore keménységnek felel meg, míg a 2,5 mm bemélyedés a 0-nak. A terhelőerő a Shore A esetében 8,064 N vagy 822 g, illetve a Shore D esetén 44,64 N, vagy 4,55 kg. A behatolás mértékét a terhelés után 15 másodperccel kell leolvasni.

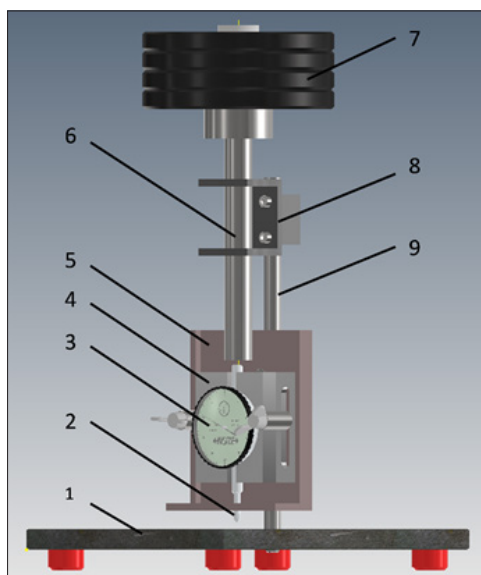


4.3. ábra. Shore-keménység mérés esetén a benyomódás mértéke

4.2. Egyedi tervezésű, Shore-keménységmérésre alkalmas berendezés

Egy egyedi tervezésű, *Shore A* és *D* keménység mérésre alkalmas berendezés 3D-s modellje a **4.4. ábrán** látható.

Az állványos Shore-keménységmérő felépítésében az 1-es alaplap és a 9-es megvezetőelem merőlegessége nélkülözhetetlen. A berendezés 2-essel jelölt eleme a behatolótest, mely cserélhető, így lehetővé válik más típusú mérés elvégzése is. Esetünkben az *A* és *D* behatolótest áll rendelkezésünkre. A 2-es behatolótest a 3-as, mikrométer pontosságú mérőórához kapcsolódik, amely a 4-es elemre van rögzítve. A 4-es elem függőleges pozicionálása a maximális, 2,5 mm méréstartomány beállításáért szükséges. A mérések elvégzése előtt a 4-es elem 5-ös hátlaphoz viszonyított helyzetét be kell állítani, úgy, hogy a behatolótest az 5-ös hátlap talpától maximálisan 2,5 mm-re legyen A kívánt magasság beállítása után a mérőóra a behatolótesttel együtt az 5-ös hátlappal mozgatható függőlegesen, így a próbatest az 1-es alaplapra helyezhető, majd az 5-ös hátlappal biztosítható a pozíciója. A minta terhelése a 7-es tömegek alkalmazásával a 8-as rúdon keresztül történik, mely a mérőórára erősített behatolótestre hat a szabvány által előírt erővel. A 8-as elem a terhelés megvezetésére szolgál, és biztosítja a merőlegességet. A mérőóra állását a terhelést követően 15 másodperccel kell leolvasni.



4.4. ábra. Egyedi tervezésű Shore-keménységmérő

A *Shore*-keménységmérést az ISO 868:2003 szabályozza, mely előírja, hogy a próbatest minimum 4 mm vastag kell, hogy legyen, illetve a méréseket a próbatest szélétől legalább 9 mm-re kell elvégezni. A keménység megállapítására legalább 5 mérést kell elvégezni, minimum 6 mm távolságot hagyva a mérési pontok között. A Shore A-keménységet a következő képlettel lehet kiszámolni:

$$Shore A = 100 \cdot \left(1 - \frac{b}{2,5 \text{ mm}}\right) \quad (4.1)$$

ahol b (mm) a mérőóráról leolvasott benyomódás mértéke.

4.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- 3 különböző gumi próbatest *Shore A* keménységének a mérése a szabványban meghatározott paraméterek mellett.
- Hőmérséklet hatása a gumi próbatestek keménységére. A próbatestek keménységét megmérjük -15 , 4 és 20 °C-on. Grafikonon ábrázoljuk a *Shore A*-keménységet hőmérséklet függvényében, egy minta esetén.
- Minden minta esetén legalább 5 mérésre van szükség a minta különböző pontjaiban.
- Az idő hatása a keménységre: mérések elvégzése a terheléstől számított 5, 15, 25, 35 és 45 másodpercben. Grafikonon ábrázoljuk a *Shore A*-keménység értéket az idő függvényében egy minta esetén.
- A terhelés hatásának vizsgálata a *Shore A*-keménységre: 0,822, 1,644 és 2,466 kg tömegek alkalmazásával. Grafikonon ábrázoljuk a *Shore A*-keménységértéket a terhelés függvényében egy minta esetén
- Minden minta esetén legalább 5 mérésre van szükség a minta különböző pontjaiban.
- Az adatokat táblázatba összegezzük.

5. KÚSZÁS ÉS FESZÜLTSGRELAXÁCIÓ

A gyakorlat célja a polimer anyagok időtől függő mechanikai tulajdonságainak tanulmányozása, elasztomerek kúszását és feszültségrelaxációját vizsgálva.

5.1. Elméleti alapok

A polimer anyagok mechanikai tulajdonságainak ismerete elengedhetetlen, hiszen ezen ismeretek alapján tervezhetünk alkatrészeket, melyek adott funkciók betöltésére alkalmasak. A polimer anyagok viszont, a fémekhez képest, egy kissé másképp reagálnak a terhelésre; a reagálás a terhelés nagyságától, időtartamától, az alkalmazott hőmérséklettől, valamint az igénybevétel sebességétől függ. Míg a fémek adott terhelési határokon belül elasztikusan viselkednek, addig ez a polimer anyagokra csak nagyon kis deformáció esetén teljesül, kivétel az elasztomer és gumifélék. A polimer anyagok a rugalmas alakváltozás után az idő, terhelés, terhelési sebesség és hőmérséklet függvényében kisebb vagy nagyobb mértékben folynak meg. Ennek értelmében a polimer anyagok nemcsak elasztikus, hanem egy időben viszkózus viselkedést is mutatnak, melyet viszkoelasztikus viselkedésnek nevezünk. Megjegyzendő, hogy az idő, amely alatt a viszkózus folyási viselkedés, észlelhető, nagyban változik a polimer típusától, illetve kémiai felépítésétől: pl. ha egy nem vulkanizált butilgumit egy felületre helyezünk $\sim 22^\circ\text{C}$ -on, 20–30 óra eltelte után elfolyik, és teljesen elveszíti eredeti alakját, kizárólag a gravitációs erő hatására. Ezzel szemben azonos hőmérsékleten egy adott formájú, polipropilénből készült alkatrész esetén nem történik alakváltozás akár több 100 év alatt sem. A műanyagok, termoplasztikus polimerek általában ezt a viselkedést mutatják. A műanyag folyási viselkedése a terhelés vagy a hőmérséklet növelésével felgyorsítható. Ennek tudható be, hogy a gépészeti alkalmazásokban nem találunk műanyag csavarkötéseket, ugyanis a csavarkötésben kialakult axiális erő hatására a műanyagok megfolynak, és a csavarkötés meglazul.

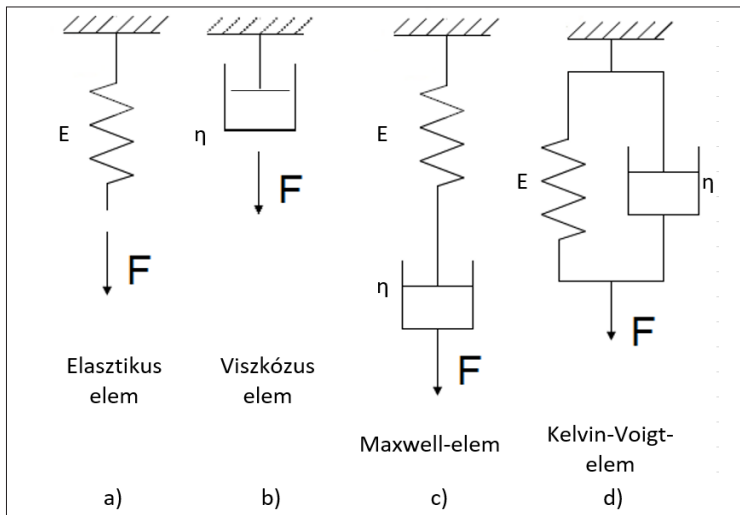
A viszkoelasztikus viselkedést két jelenség igazolja a polimer anyagok esetén: a kúszás és feszültségrelaxáció.

A kúszás (creep) az a jelenség, amely esetén egy adott polimer termék vagy próbatest állandó terhelés hatására időfüggő alakváltozást szenved. Ez egyes gumiknál akár a gravitációs erő hatására is bekövetkezik, míg a műanyagok esetén csak nagyobb erőhatás és hosszabb terhelési idő esetén következik be

A feszültségrelaxáció (stress relaxation) esetén a polimer anyagból készült termék vagy próbatest egy állandó megnyúlásnak van kitéve. Ennek hatására a próbatest anyagában feszültség ébred. A kialakult feszültség az idő függvényében egy fémből készült próbatest esetében állandó, viszont a polimer anyagoknál egyre csökken az idő múlásával.

A polimer anyagok viszkoelasztikus viselkedésének leírására több modell létezik. A polimer anyagok rugalmas viselkedését egy rugóval lehet szemléltetni, mely Hook törvényét követi, (2.3) képlet, és az E rugalmassági modulussal jellemezzük. A viszkózus viselkedést egy munkahengerrel lehet leírni, mely a newtoni folyadék viselkedését követi, (1.1) összefüggés és az η viszkozitással jellemezzük. A lineáris viszkoelasztikus tulajdonságokat leíró modellek ezen elemek kombinálásával jönnek létre: A Maxwell-modell esetén az elemeket sorba kapcsolják, míg a Kelvin-Voigt-modell esetén párhuzamosan, ahogy a **5.1. ábra** szemlélteti.

A kúszás modellezésére a Kelvin-Voigt-modell használható, míg a feszültségrelaxációt a Maxwell-modell írja le.



5.1. ábra. a) Az elasztikus viselkedés modellezése rugóval; b) a viszkózus viselkedés modellezése munkahengerrel; c) a viszkoelasztikus viselkedés modellezése a Maxwell-elemmel; d) a viszkoelasztikus viselkedés modellezése a Kelvin-Voigt-elemmel.

5.1.1. Kúszás

A kúszás modellezésére a Kelvin–Voigt-modellt használjuk. A kúszás modellezésére a paramétereket (E , η) a kúszási görbe segítségével (5.2. ábra) lehet meghatározni, mely a megnyúlást ábrázolja az idő függvényében, egy lépésszerű terhelésre, $\sigma_0 = \text{állandó}$. A megnyúlást a (5.1) képlettel számoljuk

$$\varepsilon(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_0} \quad (5.1)$$

ahol $L(t)$ a t időpillanatban mért megnyúlás. A terhelés $t = 0$ s pillanatban kezdődik és a $t = t_1$ időpillanatig tart.

A Kelvin–Voigt-modell alapján a megnyúlás-válaszfüggvényt a következő képlet írja le:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right) \quad (5.2)$$

Bevezethetjük a $\tau(s)$ relaxációs idő fogalmát, mely képlettel a következő alakban írható fel:

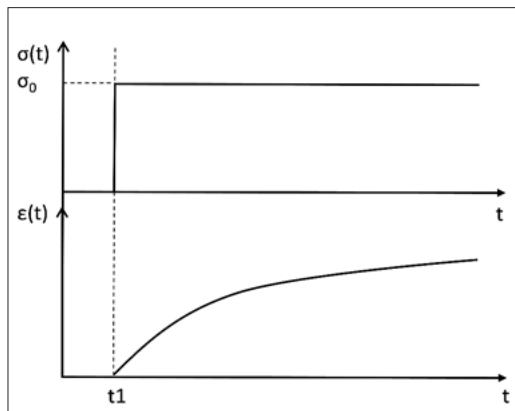
$$\tau = \frac{\eta}{E} \quad (5.3)$$

Az E paraméter meghatározásához feltételezzük, hogy a vizsgálat időtartama, $t_1 \gg \tau$, sokkal nagyobb, mint a relaxációs idő. Ennek következtében az (5.2) képletből

$$e^{-\frac{t_1}{\tau}} \sim 0 \quad (5.4)$$

Így a $t = t_1$ időpillanatban az E kiszámítható:

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t_1)} \quad (5.5)$$



5.2. ábra. A kúszási diagram a Kelvin–Voigt-modell alapján, állandó terhelés esetén

A η meghatározásához a Kelvin-Voigt-féle megnyúlás függvényét felírjuk a $t = \tau$ időpillanatra, valamint a (5.3) és (5.5) összefüggéseket behelyettesítve:

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}\tau}\right) = \varepsilon(t_1) \cdot (1 - e^{-1}) \quad (5.6)$$

A zárójel értéke 0,632, így

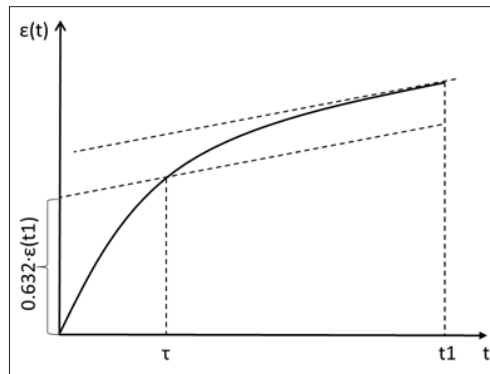
$$\varepsilon(\tau) = 0,632 \cdot \varepsilon(t_1) \quad (5.7)$$

A kúszási görbéhez érintőt szerkesztünk az $\varepsilon(t_1)$ pontba, majd az érintővel párhuzamost szerkesztünk úgy, hogy a metszet az $\varepsilon(t)$ tengelyen felmért $0,632 \cdot \varepsilon(t_1)$ értéknél legyen (5.3. ábra). Az utólag szerkesztett egyenes metszéspontját a kúszási görbével levetítjük a t tengelyre, és megkapjuk a τ -t. Az (5.3) összefüggést alkalmazva kiszámíthatjuk a η -t.

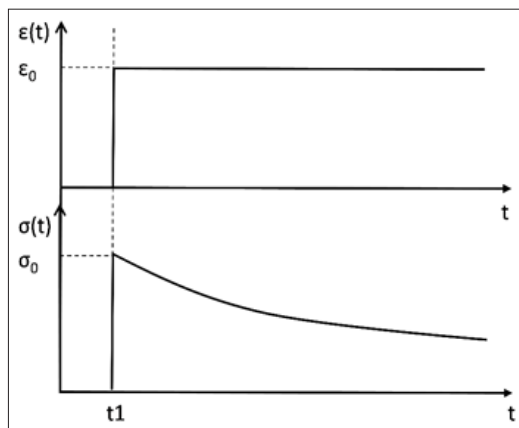
A megnyúlás értékét, a Kelvin-Voigt-modell paramétereinek ismeretében, más terhelésre és időtartamra is megbecsülhetjük. Itt meg kell jegyezni, hogy, habár a Kelvin-Voigt-modell nem írja le tökéletesen a polimer anyagok viszkoelasztikus viselkedését, a kúszással kapcsolatos alapfogalmak vizsgálatára alkalmas.

5.2.1. Feszültségrelaxáció

A polimer anyagok esetén egy deformáció ($\varepsilon = \text{állandó}$) hatására az anyagban feszültség jelenik meg. Amíg a fémeknél az idő függvényében állandó, addig a polimer anyagok esetén a feszültség a kezdeti σ_0 értékről folyamatosan csökken. A feszültség csökken és tart a 0 felé, ami a polimer láncok egymáshoz való elcsúszásának következménye, mely maradandó alakváltozást eredményez. Ennek értelmében a kezdeti, teljesen rugalmas alakváltozás irreverzibilis alakváltozássá alakul át az idő függvényében.



5.3. ábra. A Kelvin-Voigt-modellparaméterek meghatározása a kúszási diagramon



5.4. ábra. A feszültségrelaxáció állandó deformáció esetén

A Maxwell-modell által meghatározott feszültség válaszfüggvény az $\varepsilon = \varepsilon_0$ megnyúlásra:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (5.8)$$

A **5.4. ábrán** látható $\sigma(t)$ válaszfüggvény segítségével meghatározhatjuk az idő függvényében a relaxációs modult:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (5.9)$$

5.2. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- Kúszás tanulmányozása:
- Elasztomer próbatest méreteinek meghatározása, L_0 kezdeti hossz megjelölése.
- A próbatest méretei és az alkalmazott tömeg alapján a σ_0 kiszámítása.
- A próbatest terhelésével az $\varepsilon(t)$ -t diagram megszerkesztése.
- A 5.1.1.-ben tárgyalt Kelvin-Voigt-modell paramétereinek meghatározása, majd a megnyúlási válaszfüggvény segítségével a prediktív kúszási diagram megszerkesztése és összehasonlítása a mért kúszási diagrammal.
- A feszültségrelaxáció vizsgálata:
- Egy elasztomer próbatestet $\varepsilon_0 = 300\%$ megnyújtunk, és mérjük a gerjesztett erőt, amiből feszültséget számolunk.
- Megszerkesztjük a $\sigma(t)$ -t és az $E(t)$ -t diagramokat.

II. MŰANYAGOK
FELDOLGOZÁSTECHNIKAI LABORATÓRIUMA

6. DARÁLÁS

A gyakorlat célja a műanyag termékek darálásának gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai paraméterek megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található darálóberendezés felépítésének és működési elvének megismerése.

6.1. Elméleti alapok

A műanyagok, számos előnyös tulajdonságaiknak köszönhetően, napjainkban nélkülözhetetlenné váltak az iparban és a mindennapi felhasználók számára egyaránt. A fémekhez hasonlítva számos előnyük van, melyek az egyes iparágakban, például autóipar, építőipar stb. előidéztek az alkatrészek, egységek műanyagból való készítését fémek használata helyett. Az egészségügyben használt eszközök jelentős része szintén műanyagból készül, gondoljunk csak a legegyszerűbbekre: fecskendő, katéter, vezetékek stb. Viszont, ami talán a legszembetűnőbb, az a csomagolóipar, és nem feltétlenül abban a fázisban, mikor még a bevásárlóközpontok polcain található a termékek, élelmiszerek, hanem amikor már a természetben találkozunk ezekkel a csomagolóanyagokkal. Érdeemes megjegyezni, hogy az évi műanyag-felhasználás közel 40%-a a csomagolóipart szolgálja ki. Tagadhatatlan a környezetszennyezés, melyet a műanyag csomagolóanyagok okoznak, gondolhatunk itt például a Japán közelében található keleti szemétszigetre és a Hawaii közelében található nyugati szemétszigetre, melyeket az áramlatok sodortak össze, és több tízezer km² területet fednek be. Ezek a szemétszigetek szinte kizárólag a csomagolóiparban felhasznált és nem megfelelően kezelt hulladékból állnak. A problémát tetőzi a műanyagok lassú lebomlási ideje, ami akár több száz év is lehet.

A probléma orvoslása céljából a műanyag újrahasznosítása nagy figyelmet kapott az elmúlt években. Habár a műanyag hulladék nagy részét pirolízissel semmisítik meg, fűtőanyagként felhasználva, jelentős figyelmet kapott a hulladék újrafelhasználása is. Ennek érdekében a lakosságot arra ösztönzik, hogy sze-

lektíven gyűjtsék a műanyag hulladékot. Egy jelölésrendszer is kialakult, mely informálja a felhasználót az adott csomagolóanyag típusáról. Habár a műanyag újrahasznosításának számos előnye van, technológiai és gazdasági fenntarthatósága a jelen körülmények között megkérdőjelezhető. Technológiai szempontból, azon túlmenően, hogy a műanyagokat a többi hulladéktól különválasztottuk, egy második szelekció is meg kell, hogy történjen, mely az azonos típusú műanyagokat szelektálja. Mechanikai szempontból megfelelő termék gyártásához megfelelő alapanyag szükséges. Az újrahasznosítás során a műanyagok mechanikai tulajdonságai romlanak (darabolás és hőhatás következtében), és keverednek szennyezőanyagokkal, illetve más műanyagokkal, ami tovább rontja általában a mechanikai tulajdonságokat. Így, az újrahasznosított műanyagok felhasználása korlátozott.

A műanyag termékek szelektív gyűjtésére használt számozás:

1 – PET

2 – HDPE

3 – PVC

4 – LDPE

5 – PP

6 – PS

7 – más típusú polimer.

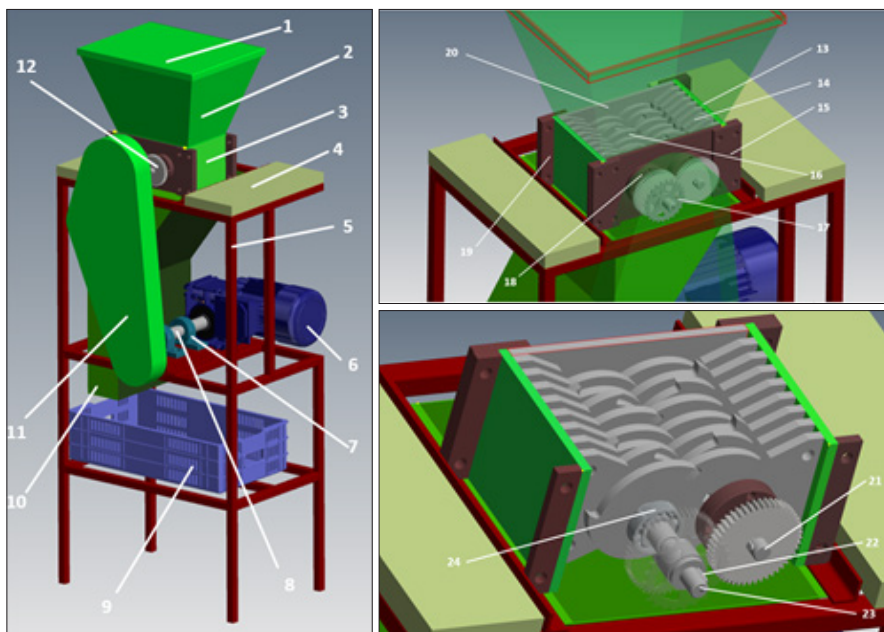
A műanyagok újrahasznosításának első lépése a szelektív hulladékgyűjtés. Ezt követően egy válogatási folyamat szükséges, mely során a műanyag termékek alapanyag és szín szerinti válogatása történik meg. A továbbiakban következik a darálási folyamat, mely kulcsfontosságú a további feldolgozásra nézve. A darálás lényege, hogy a terméket minél kisebb szemcseméretre hozza. A darált műanyagról eltávolítják a szennyeződést, és megmossák, majd szárítják, előkészítve a következő fázisra. A darált műanyag hulladékból extruder segítségével szálakat gyártanak, majd a szálakat feldarabolva granulátumot készítenek, mely alapanyagként használható további műanyag termékek gyártására.

6.2. Egyedi tervezésű műanyagdaráló berendezés

A szakirodalom számos darálóberendezést tárgyal, viszont minden esetben tengelyekre szerelt kések nyírják el a műanyag terméket. A **6.1. ábrán** egy egyedi tervezésű darálóberendezés látható. Az 1-es fedőlap biztonsági szerepet tölt be; a 2-es felöntőgaraton helyezkedik el. A felöntőgarat a 3-as darálóegységre van szerelve, mely az 5-ös vázszerkezetre van rögzítve. A darálóegységből távo-

zó műanyag darabok a 9-es tárolóba érkeznek, a 10-es elvezetőcsövön keresztül. A vázszerkezethez kapcsolódik a meghajtást biztosító, 6-os fordulatszám-csökkentővel ellátott villanymotor, illetve az ehhez tartozó kinematikai lánc elemei és a lánchajtás borítása is. A villanymotor és a daráló tengelye közti erőátvitelt lánchajtás biztosítja.

A darálást megvalósító 3-as egységben két tengely található, 21 és 23, melyeken a forgó kések, 16, helyezkednek el. A tengelyek azonos szögsebességét, de ellentétes forgásirányát a 12-es, egyenes fogazatú fogaskerék-hajtás biztosítja. A **6.1.c ábrán** megfigyelhető, hogy a 16-os kések 30° szögostással helyezkednek el a 21-es és 23-as tengely mentén, annak érdekében, hogy a berendezés terhelése folyamatos legyen. A 14-es ellenkésék fontos szerepet töltenek be a berendezés üzemeltetése során, mivel ezeknek az elemeknek köszönhetően nem fog darált műanyag felhalmozódni a 16-os forgó késeken. A kinematikai láncban a nyomatékátadás reteszkötésekkel valósul meg.



6.1. ábra. A tervezett darálóberendezés 3D-s modellje. 1 – fedőlap, 2 – felöntőgarat, 3 – darálóegység, 4 – borítás, 5 – vázszerkezet, 6 – villanymotor, 7 – önbeálló csapág, 8 – közlőtengely, 9 – tároló, 10 – elvezetőcső, 11 – láncvédő, 12 – fogaskerék, 13 – darálódoboz lapja, 14 – ellenkés, 15 – a daráló dobozát összekötő lap, amely a 20-as laphoz van hegesztve, 16 – a daráló kései, 17 – lánckerék, 18 – csapágyház, 19 – a daráló dobozát összekötő lap, amely a 13-as laphoz van hegesztve, 20 – a daráló dobozának oldalsó lapjai, 21, 23 – tengely, 22 – retesz, 24 – gördülő csapág

6.3. Mérések

A gyakorlat során vizsgálni kell a darálendő termék anyagának és vastagságának hatását a keletkezett szemcseméretre.

- PET-, PP-, HDPE- és LDPE-anyagú hulladék darálása esetén a szemcseméretet le kell mérni, és az anyagfajta függvényében ábrázolni.
- Különböző vastagságú PE-lapok darálása esetén szintén meg kell vizsgálni a szemcseméretet, és azt ábrázolni kell a vastagság függvényében.

A szemcseméret meghatározásához tolómércét használva minimum 30 szemcsét kell megmérni, melyből a területet számoljuk, majd átlagot és szórást.

7. EXTRÚZIÓ (KISAJTOLÁS)

A gyakorlat célja az extrúzió (kisajtolás) gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai változók megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található extruder felépítésének és működési elvének megismerése.

7.1. Elméleti alapok

Az extrúzió a legtermelékenyebb műanyag-feldolgozási technika: százalékos elosztásban extrúzióval dolgozzák fel az éves műanyaghasználat legjelentősebb részét. Extrudálás során a műanyagot ömledék- (nagy viszkozitású folyadék) állapotba kell hozni, homogenizálni kell, nyomás alá kell helyezni, és át kell sajtolni egy nyitott szerszámon. A műanyag-megmunkálás minden formája hőt alkalmaz, annak érdekében, hogy a műanyagot a folyási hőmérséklete fölé fűtse, majd egy adott technikával egy formát vagy szerszámot kitöltsön. Az extruder esetében állandó keresztmetszetű terméket (pl. cső, profil stb.) lehet gyártani folyamatos üzemben. Az extruder termelékenysége igen nagy. Az extrudert nemcsak műanyag vagy gumitermékek előállítására használják, hanem mesterkeverék is létrehozható, ami az alapanyag mellett más adalékanyagot is tartalmaz (pl. tűzálló vagy UV-álló adalékanyag, színezék). Ebben az esetben granulálás (méretre aprítás) követi az extrudálást. Extrúzió esetén, miután a termék kilép a szerszámból, még képlékeny állapotban van, így le kell hűteni, és eközben kell biztosítani a méretpontosságot.

Az extrudálási hőmérséklet a használt alapanyag függvényében változik, csakúgy, mint az extrudercsiga műszaki jellemzői. Az alapanyag anyagszerkezete szintén jelentős hatást gyakorol az extrúziós folyamatra. Egyes alapanyagokat, melyek hajlamosak jelentős vízfelvételre, mint pl. a PA, szárítást igényelnek felhasználás előtt. A **7.1. táblázat** az tömeggyártásban használt műanyagok tipikus extrudálási hőmérsékletét összegzi.

7.1. táblázat Tipikus extrudálási hőmérséklet értékek

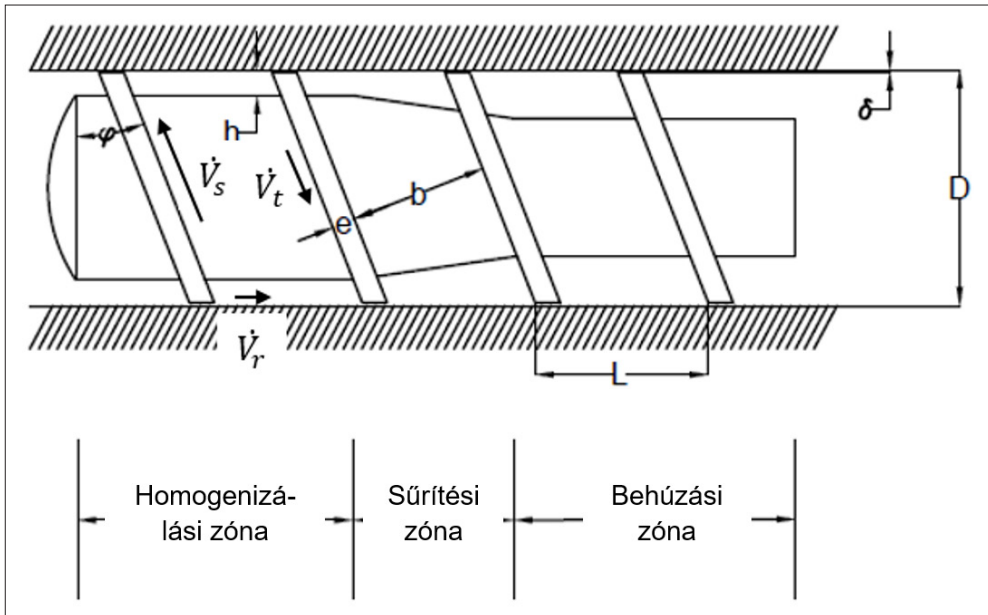
Anyag	Extrúziós hőmérséklete (°C)
LDPE	125–135
HDPE	140–170
PP	185–240
PS	170–200
IPVC	155–160
ABS	180–200
PA	250–300
PMMA	160–180
POM	180–200
PC	250–300

Az iparban használatos extruderek felépítés szempontjából komplikáltak, hiszen az állandó nyomást és hőmérséklet-eloszlást a szerszámban biztosítani kell a méretpontosság megőrzése érdekében. Röviden: az extruder magában foglal egy hajtásláncot, amely az extrudercsigát hajtja meg. A csiga a hengerben található. A hengerbe a garaton keresztül adagolható a granulátum vagy a darált, újrahasznosításra szánt műanyag. A műanyag megömlesztését a henger fűtésével, illetve a csiga forgó mozgásából adódóan a granulátum szemcséi közt jelentkező súrlódás hatására megjelenő hő segítségével érik el.

Az extrudercsiga speciális kialakítása a **7.1. ábrán** látható. Az ábrát megvizsgálva láthatjuk, hogy a csiga magátmérője változik, valamint a csigát három zónára tagolhatjuk:

- behúzási zóna
- sűrítési zóna
- homogenizálási zóna.

Az egyes zónákban valósul meg a műanyag granulátum vagy dara megömlesztése, homogenizálása és nyomás alá helyezése. A behúzási zóna feladata a granulátum szállítása a garattól a szerszám irányába. A zóna vége felé a műanyag megömlesztése is elkezdődik. A sűrítési zónában, ahogy azt a **7.1. ábra** is mutatja, fokozatosan növekszik a csiga magátmérője, aminek hatására a szilárd granulátumdarabok nagyobb erővel nyomódnak egymáshoz, megnövelve a súrlódási erőt. Így nagyobb hő termelődik, és a szakasz végére a műanyag meg-



7.1. ábra. Az extrudercsiga felépítése és jellegzetes méretei: φ - menetemelkedés szöge, h - menetmélység, D - az extruderhenger belső átmérője, δ - illesztési hézag, L - egy fordulatra jutó menetemelkedés, b - menetárok szélessége, e - menetszárnny szélessége

ömlesztése befejeződik, illetve elkezdődik a homogenizálási folyamat. Ezzel egy időben a nyomás is megnövekedik, ami a termék minőségét befolyásolja. A homogenizálási zóna a már megömlesztett műanyag és esetleges adalékanyagok vagy színezék tökéletes elkeveredését biztosítja. A csiga folyamatos forgása által a megolvadt és homogén műanyag átpréselődik a szerszámon, ezáltal felveszi a szerszámban kialakított termék keresztmetszeti alakját.

Az extruder kihozatala (termelékenysége) a (7.1) képlettel számolható:

$$\dot{V}_e = \dot{V}_s - \dot{V}_t - \dot{V}_r \quad (7.1)$$

A képletben (\dot{V}_e) az eredő térfogatáram (kihozatal), (\dot{V}_s) a sodróáram (kiszálítási áram), (\dot{V}_t) a torlóáram és (\dot{V}_r) a résáram. Az extruderhenger és a csiga közti δ rész mérete kicsi, így a résáramot elhanyagolhatjuk, mivel a résben megolvadt ömledék található, aminek tömítő és kenő szerepe is van. A torlóáram az extruderben kialakult nyomáskülönbség hatására jön létre, és a kihozatalra negatívan hat. A sodróáram, ezzel ellentétben, a kihozatalra pozitívan hat, és a csiga forgásából adódik, mely a képen jobbról balra szállítja a granulátumot s majd az ömledéket.

Ha az ömledéket newtoni folyadékként kezeljük, és izoterm körülményeket feltételezünk, akkor a sodró- és a torlóáramot a következő képletekkel lehet kifejezni:

$$\dot{V}_s \sim b \cdot h \cdot n \quad (7.2)$$

$$\dot{V}_t \sim \frac{b \cdot \Delta p \cdot h^3}{\eta \cdot l} \quad (7.3)$$

A képletekben n a csiga fordulatszáma, l a csatorna hossza, Δp a nyomáskülönbség és η a polimer ömledék viszkozitása.

A (7.1), (7.2) és (7.3) képleteket figyelembe véve kijelenthetjük, hogy az extruder kihozatala a feldolgozási tényezők függvényében a következőképpen változik: ha növeljük az n fordulatszámot, a kihozatal növekszik, illetve, ha azonos fordulatszámnál csökkentjük a viszkozitást, vagyis kisebb hőmérsékletet használunk, szintén növekszik a kihozatal. Adott csiga és szerszám konfigurációja esetén a képletekben használt technológiai tényezők állandók.

Az extruder alakadó szerszáma felépítésileg elég összetett, ezért a tervezési folyamata során figyelembe kell venni a polimer ömledék áramlási tulajdonságait. A szerszám feladata tulajdonképpen az, hogy az extruderből kiáramló, kör keresztmetszetű műanyagömledék-áramot a kívánt alakú keresztmetszetre hozza. Extrudálás esetén a termék minősége az egyenletes nyomás- és hőmérséklet-eloszlásfüggvénye, emiatt a szerszámot oly módon kell kialakítani, hogy a szerszámon kiáramló ömledék minden pontján az áramlási sebesség ugyanaz legyen. Üreges termékek esetén, a műanyag ömledék áramlása zavaros, hiszen a termékben az üreget kialakító tüske a szerszám házához kell, hogy kapcsolódjon. A könnyebb megértés érdekében képzeljük el, hogy egy folyón található híd lábának jelenléte milyen hatással van a víz áramlására a híd lábának talapzata közül.

Az extruderszerszám felépítés szempontjából 3 szakaszra osztható:

- átmeneti szakasz
- alakadó szakasz és
- simító szakasz.

Az alakadó szakasz az extruderből kilépő, kör keresztmetszetű anyagáramot a kívánt keresztmetszeti alakhoz közelíti. Az alakadó szakasz a kívánt, végső keresztmetszetet alakítja ki, majd a simító szakasz a műanyag termék alakját és méretét stabilizálja a keresztmetszet szűkítésével és a nyomás növelésével.

Fontos megjegyezni, hogy a műanyag ömledék viszkoelasztikus tulajdonság-

gal bír, ami azt jelenti, hogy a viszkózus folyási tulajdonság mellett elasztikus tulajdonsága is van. Ez a tény nagyban megnehezíti az extrúzió által előállított termékek méretpontosságának betartását, hiszen minden esetben megjelenik a kifolyási duzzadás (angolul: die swell). Ez azt jelenti, hogy a szerszám által meghatározott termékméretet nem fognak megegyezni az extrudált termék méretével, mivel a termék megduzzad a szerszámból kilépve. Ezt a jelenséget, extrúziós hibát, megfelelő szerszámtervezéssel kompenzálni lehet, ami a simító szakasz hosszának növelésével érhető el. Ebben az esetben a polimer ömledék hosszabb időt tölt ugyanabban a keresztmetszetben, így a relaxációs folyamatnak köszönhetően (az elasztikus hatás minimális lesz) felveszi a kívánt méretet és formát.

Az extrudált termékek esetében a méretpontosság megtartását kalibrálással érik el. Többféle kalibrálási eljárás létezik a kalibrált felület függvényében, csövek esetén például a külső vagy a belső átmérő. Mivel az extrúzió folyamatos üzemű műanyag-feldolgozási technika, a terméket felcsévélni vagy darabolni kell. Ennek érdekében egy egész sor követő berendezés illeszkedik az extruderhez.

7.2. Egyedi tervezésű extruder

A **7.2. ábrán** egy egyedi tervezésű extruder látható, melynek kivitelezésekor a célkitűzés egy olyan didaktikai eszköz létrehozása volt, melyen az extrúzió folyamatát be lehet mutatni, működési elvét meg lehet érteni, és a feldolgozási technológiai tényezőket tanulmányozni lehet.

A granulátum vagy az újrahasznosításra szánt, darált műanyag az 1-es garatba kerül, és a 2-es csiga forgómozgása hatására a garattól a szerszám felé halad a 3-as hengerben. Az iparban használt csiga felépítéséből adódóan drága, így a tervezett extruderben a csigát egy fafúró (**7.2.b ábra**) helyettesíti. A csiga forgómozgását egy váltakozó áramú villanymotor biztosítja, mely fordulatszám-csökkentővel van felszerelve. A motor és a csiga közti kapcsolatot egy egyedi tervezésű alkatrész valósítja meg. A műanyag megömlesztéséhez szükséges hőt 4 darab, egyenként 200 W teljesítményű fűtőelem, 4-es, biztosítja. A fűtőelemeket 1–3 elosztásban lehet szabályozni a 6-os hőmérséklet-szabályzókkal, így biztosítva a hőmérséklet változtatási lehetőségét a henger mentén, akár csak az iparban található extruderek esetében. A henger végén a 7-es szerszámbefogó elem található, melyhez a 8-as szerszám csatlakozik. Jelen esetben a szerszám egy 3 mm átmérőjű műanyag szál létrehozására alkalmas. A 9-es

csavar a szerszámbefogó alkatrészhez csatlakozik, melynek szerepe az extruderben kialakult nyomás változtatási lehetőségének biztosítása. A (7.3) képlet alapján láthatjuk, hogy az extruderben kialakult nyomáscsökkenés pozitív hatást fejt ki a torlóáramra, így csökkenti a kihozatalt. Az extrudercsiga fordulatszámát 0–70 1/min között lehet változtatni.

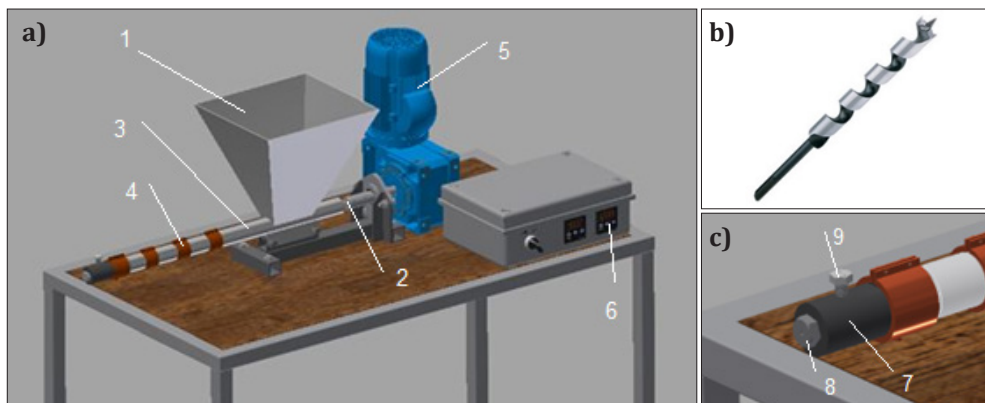
A **7.3. ábra** a berendezés hőmérséklet-szabályozásához szükséges kapcsolási rajzot mutatja be. A K-típusú hőmérséklet-érzékelők a szerszámtartóba és a henger közepére kerültek; a hőmérséklet-szabályzók bemeneti jeleit szolgáltatják.

7.3. Mérések

A gyakorlat során, LDPE-t használva, a következő feladatok elvégzése szükséges:

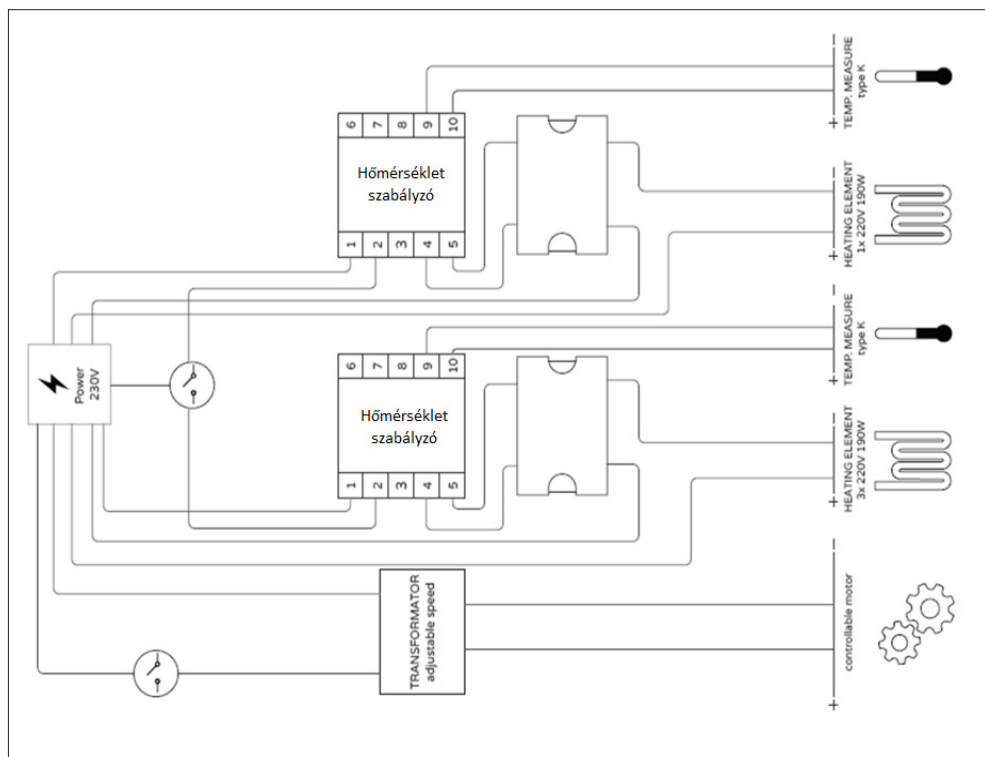
- A kihozatal mérése a fordulatszám függvényében. Az extrudálási hőmérséklet $T = 200\text{ °C}$, a fordulatszámot változtatjuk: $n = 30, 50$ és 70 1/min . A kihozatal számításához $t = 10\text{ s}$ után megmérjük az extrudált szál tömegét, és kiszámoljuk kg/h-ban a kihozatalt. Minden fordulatszámon háromszor meg kell ismételni a mérést, amiből átlagot és szórást számolunk. A kihozatalt a fordulatszám ($\dot{V}_e - n$) függvényében ábrázoljuk.
- A kihozatal mérése a hőmérséklet függvényében. A csiga fordulatszámát beállítjuk $n = 50\text{ 1/min}$ -re, és az extrudálási hőmérsékletet változtatjuk $T = 190, 200$ és 210 °C -ra. A kihozatal számításához $t = 10\text{ s}$ után megmérjük az extrudált szál tömegét, és kiszámoljuk kg/h-ban a kihozatalt. Minden fordulatszámon háromszor meg kell ismételni a mérést, amiből átlagot és szórást számolunk. A kihozatalt a hőmérséklet ($\dot{V}_e - T$) függvényében ábrázoljuk.
- A kifolyási duzzadás (die swelling) mérése a fordulatszám függvényében. $T = 200\text{ °C}$ és $n = 30, 50$ és 70 1/min -en mérjük az extrudált szál átmérőjét legalább 5 különböző helyen, majd átlagoljuk (D_t), és a (7.4) képlettel kiszámoljuk a százalékos kifolyási duzzadást, s végül ábrázoljuk a fordulatszám függvényében ($DS - n$). A szerszám átmérője $D_{sz} = 3\text{ mm}$.

$$DS = \frac{D_t - D_{sz}}{D_{sz}} \cdot 100 \quad (7.4)$$



7.2. ábra. Az egyedi tervezésű extruder

- a) 3D-s modell: 1 – garat, 2 – csiga, 3 – henger, 4 – fűtőelem, 5 – villanymotor, 6 – hőmérséklet-szabályzó, 7 – szerszámbefogó, 8 – szerszám, 9 – nyomásváltoztatásra alkalmas csap,
 b) extrudercsiga helyettesítésére szolgáló fafűrő,
 c) az extruderszerszám befogórésze



7.3. ábra. A hőmérséklet-szabályzás kapcsolási rajza

8. GRANULÁTUMKÉSZÍTÉS

A gyakorlat célja a granulátum-előállítási folyamat gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai tényezők megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található granulátum-előállító berendezések felépítésének és működési elvének megismerése.

8.1. Elméleti alapok

A műanyagok megmunkálása során nagyon fontos, hogy az alapanyag milyen formában áll rendelkezésre. Az alapanyag állagától függően, annak adagolása a gyártási folyamat során más és más megoldásokat igényel. Általánosan beszélve, a polimer alapanyagok a következő formában találhatók a kereskedelemben:

- granulátum,
- por,
- paszta,
- folyadék.

A legelterjedtebb forma a műanyagok esetén a por vagy a granulátum használata. Ezek közül is a granulátum a közkezdveltebb, mivel számos előnye van, mint például a könnyű kezelhetőség, szállítás, adagolás. A vulkanizált szilikongumiból készült termékek előállításakor (fröccsöntéssel) például a szilikongumi monomerjét, esetenként oligomereket használják. A feldolgozás során speciális gépek és adagolóegységek szükségesek a folyékony alapanyag kezeléséhez, például fröccsöntés esetén. A térhálósítást is magában foglaló fröccsöntést reaktív fröccsöntési folyamatnak nevezik.

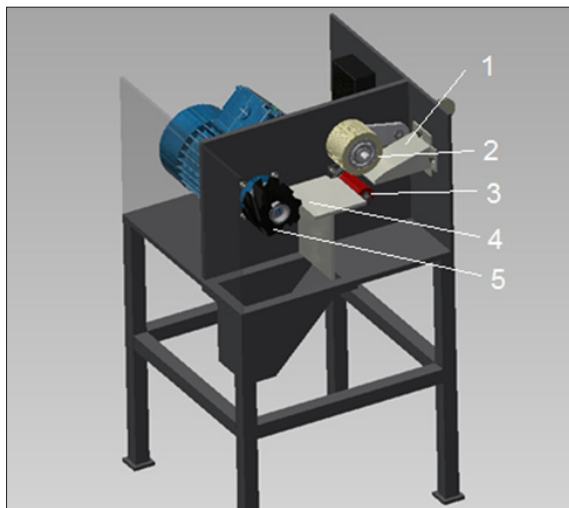
A granulátum egy adott hosszúságú és átmérőjű műanyag darab, melynek a mérete 2–4 mm között változhat. A granulátum előállítására többféle eljárást fejlesztettek ki, viszont mindenik esetben szükséges egy vagy több műanyag szál létrehozása. A szálak gyártását extruderrel valósítják meg, majd a szálak darabolása következik, ami a granulátum létrehozását eredményezi. A granulátumkészítő berendezéseknek két fő típusát különböztetjük meg:

- száldaraboló,
- forgókéses granulátumkészítő berendezések.

A száldaraboló granulátumkészítő berendezések lehetnek egykéses vagy kétkéses kivitelezésűek. A száldaraboló granulátumkészítő berendezések esetén szükség van egy vagy több műanyag szálra, melyek lehűlt, megdermedt állapotban vannak. A berendezés ezeket a szálakat darabolja fel forgókések segítségével. A szálak és a forgókések tengelyei 90° -os szöget zárnak be. Az egykéses kivitelezés részletes bemutatására sor kerül a későbbiekben. A folyamat termelékenysége relatíve kicsi, így, inkább kutatólaboratóriumokban találkozunk ezzel a kivitelezéssel. A termelékenységet a szálak számának növelésével lehet elérni. További hátrányt jelent a kések fenése kopás esetén.

A kétkéses kivitel esetén két forgó kés közé vezetik be a műanyag szálát vagy szálakat, mely hatására megtörténik a szálak darálása. A gép felépítése viszonylag bonyolult, és biztosítani kell, hogy a két kés azonos szögsebességgel forogjon ellenkező irányba, amit fogaskerekekkel érnek el. Az elkopott kések újrafenése nehézkes, és a termelékenysége is hasonló az egykéses kivitelhez; így ez a típus nem terjedt el.

A forgókéses granulátumkészítő berendezés esetén a műanyag szálak nincsenek dermedt állapotban, vagyis ennél a típusnál a forgókések egy tengelyen helyezkednek el az extruder végén. Az extruderszerszám helyett egy rosta található, melyen a műanyag még ömledék formájában halad át, melyet a forgókések elnyírnak, így létrehozva a granulátumot. Ennek a kivitelnek a termelékenysége nagyobb, mint a száldarálás esetén, és az ipari granulátumkészítést szinte kizárólag ezekkel a típusokkal valósítják meg. Felépítés szempontjából is egyszerűbbek, mint a száldaráló gépek, valamint helyigényük is kisebb. A szálak és a forgó késeket tartó tengely párhuzamosak. A száldaráló berendezésekhez képest a működtetésük is egyszerűbb, hiszen a száldarálónál az extruderből kilépő szálakat le kell hűteni, és be kell fűzni a száldarálóban. A forgókéses kivitelezés esetén ilyen probléma nem jelentkezik. További előnyt jelent a kések újrafenése, mivel egyszerű az élgeometria, illetve a kés kopásának nincs hatása a granulátum méretére, eltérően a száldarálás esetétől. A felsorolt előnyöket természetesen ellensúlyozza a jelentős kezdeti befektetés, mely az ilyen típusú granulátumkészítő berendezésekre jellemző. Így kisebb mennyiségű granulátum készítése esetén vagy egy mesterkeverék kidolgozásához a száldaraboló módszert használják.



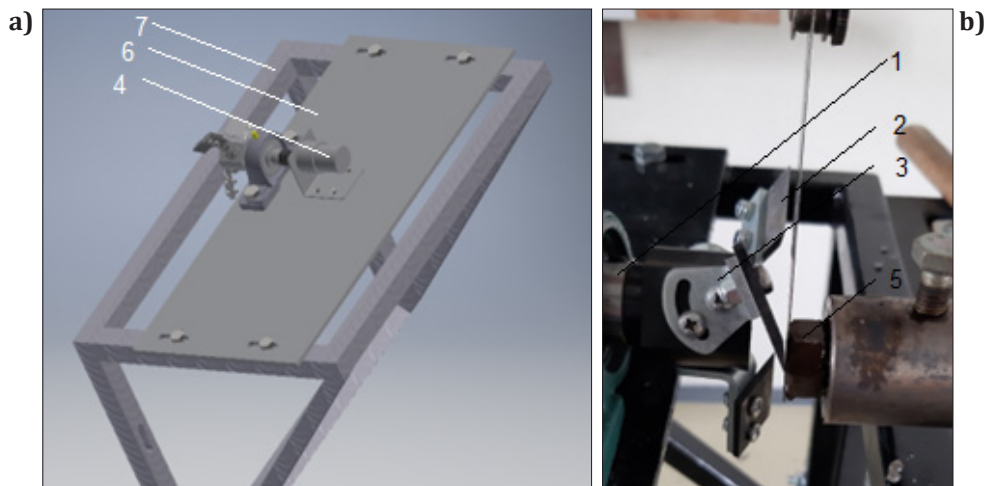
8.1. ábra. Egykéses, száldaraboló, granulátum-előállító berendezés

8.2. Egyedi tervezésű, granulátumkészítő berendezés

Egy egyedi tervezésű, egy forgókéses, száldaraboló granulátumkészítő berendezés látható a **8.1. ábrán**. A berendezés működési elve: a műanyag szál elvezetése egy adott előtolással a forgó késhez, amely a szál darabolását végzi. A műanyag szál az 1-es garaton keresztül lép be, majd a 2-es és 3-as tengelypár közé kerül. A granulátum hosszának méretét a tervezett berendezés esetén kizárólag az előtolás változtatásával lehet elérni, mivel a forgókés fordulatszáma állandó. A 2-es tengely nyomást gyakorol a tengelyek közt elhelyezkedő műanyag szálra, míg a 3-as tengely az előtolást biztosítja. A 3-as tengely fordulatszámát változtatni lehet, ami a műanyag szál adagolási sebességét befolyásolja. A 4-es, ún. álló kés megvezeti és megtámasztja a szálat, míg az 5-ös forgó kés elnyírja azt, így létrehozva a granulátumot. A forgó kés jelen esetben egy palástmaró.

8.2.1. Forgókéses granulátumkészítés

A **8.2. ábrán** egy egyedi tervezésű, forgókéses, granulátumkészítő berendezés látható. A berendezés tengelye, 1, párhuzamos az extruderhenger tengelyével, viszont excentrikus elhelyezésben található. A három kés, 2-es, mely az extruderből kiáramló, még képlékeny állapotban levő műanyagot vágja, 120°-os osztásban található, és a tengelyhez állítási lehetőséget biztosító csatlakozó elemhez, 3, kapcsolódik. A kések forgómozgását egy egyenáramú villanymotor, 4, biztosítja, amelynek a fordulatszáma változtatható. A berendezés megfelelő



8.2. ábra. Forgókéses, granulátumkészítő berendezés:
a) 3D-s modell és b) felszerelt állapot

pozicionálását az extruderszerszámhoz, 5, a berendezés tartólapja, 6, és váza, 7, segítségével lehet megvalósítani.

A műanyag granulátum méretének befolyásolására több lehetőség is rendelkezésre áll:

- az extruderszerszám átmérőjének változtatása
- a kések szögsebességének változtatása
- az extrudercsiga fordulatszámának változtatása.

8.3. Mérések

A laborgyakorlat elkezdése előtt a berendezések megismerése és működési elvének elsajátítása szükséges. A forgó kések kivitelezéssel fontos a kések megfelelő beállítása az extruderszerszámhoz képest.

Az elvégzendő feladatok:

a) Granulátum előállítás száldaraboló módszerrel, változtatva az előtolási sebességet. Eredményként a granulátum hosszát ábrázoljuk az előtolási sebesség függvényében.

b) Granulátum előállítás forgókékes módszerrel, változtatva a

- forgókések szögsebességét,
- az extrudercsiga fordulatszámát.

Minden esetben megmérjük a granulátum hosszát, átlagot és szórást számítunk legalább 50 granulátumra, majd ábrázoljuk a granulátum méretét a szögsebesség, illetve a csiga fordulatszáma függvényében.

9. FRÖCCSÖNTÉS

A gyakorlat célja a fröccsöntési folyamat gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai paraméterek megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található fröccsöntőgép felépítésének megismerése, a fröccsöntő szerszám bemutatása és a szerszámkitöltési folyamat szemléltetése.

9.1. Elméleti alapok

A fröccsöntés a második leghasználtabb és legtermelékenyebb műanyag-feldolgozási technika az extrúzió után. Az extrúzióval ellentétben a fröccsöntéssel szinte bármilyen formájú háromdimenziós alakot lehet gyártani. A kívánt forma kialakításához szükség van egy fröccsöntőgépre, melynek feladata megömlesztetni a használt műanyag granulátumot, majd egy zárt szerszámba fecskendezni, nagy nyomáson, rövid idő alatt, ami biztosítja a szerszám kitöltését. A termék a végleges formáját a hűtési folyamat után éri el. Az említett lépések végrehajtásának sorrendje kritikus, mely lépéseket a fröccsöntési ciklus tartalmazza.

9.1.1. A fröccsöntési ciklus

A fröccsöntési ciklus egy jól meghatározott sorrend, melyet a fröccsöntés folyamata alatt be kell tartani annak érdekében, hogy a fröccsöntött termék megfelelő minőségű legyen:

- *Szerszámzárás.* Az első lépése a fröccsöntési folyamatnak a szerszámzárás, hiszen nyitott szerszámba nem érdemes a műanyag ömledéket bepréselni. Miután megtörtént a szerszámzárás, a záróerő létrehozása következik. A záróerő biztosítja azt, hogy a szerszámfelek megfelelő erővel kapcsolódnak, és a fröccsöntés alatt nem nyílnak szét.
- *Fúvóka előremozgása.* A záróerő kialakítása után a fröccsegység előrehalad, és a fúvóka összekapcsolódik az álló oldali formalapban található beömlő persellyel. A fúvóka egy adott erővel feszül neki a szerszámnak, annak érdekében, hogy a fröccsöntés közben a műanyag ömledék ne szivároghasson ki a csatlakozási pontnál. Itt érdemes kihangsúlyozni a sorrend fontosságát,

hiszen, ha a szerszámzárás még nem történt meg, és nyitott szerszám esetén kapcsolódik a fúvóka az álló szerszámféllel, megvan az esélye annak, hogy a szerszámot lenyomja a fröccsöntőgépről.

- *Fröccsöntés (befröccsöntés és utónyomás).* A záróerő létrehozása és a szerszámfröccsegység kapcsolat kialakítása után megtörténhet a fröccsöntés, mely két szakaszra bontható. Az első szakasz a befröccsöntési szakasz, ami alatt tulajdonképpen a műanyag ömledék kitölti a szerszámüreget, míg a második szakasz az ún. utónyomási szakasz. Ahhoz, hogy az utónyomás fontosságát megértsük, tárgyalnunk kell a műanyagok fajlagos térfogatváltozását a hőmérséklet függvényében. A polimer anyagok a fémekkel szemben jelentős térfogatváltozást szenvednek a hőmérséklet-változás hatására. A fröccsöntés során a műanyag $\Delta T = 200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet-különbséget is tapasztalhat, ami nagymértékű, műanyagtípustól függően 8–10%, térfogatváltozást eredményez. Ezt a térfogatváltozást **zsugornak** nevezzük. A zsugort két szakaszban tudjuk kompenzálni: az első szakasz az ömledék összenyomásával, míg a második szakasz a fröccsöntő szerszám tervezésekor valósul meg. Az első szakaszban tehát az ömledéket, befröccsöntés után, nyomás alá kell helyezni, ezáltal kompenzálva a zsugor nagy részét, melyet az utónyomás alkalmazásával érünk el. Az utónyomást addig alkalmazzuk, amíg a műanyag a legkisebb keresztmetszeten megdermed a szerszámban, ezt **lepecsételődési pontnak** nevezzük, ezáltal meggátolja a nyomásközvetítést. A második szakaszban a zsugort már nem tudjuk nyomással kompenzálni, hiszen a terméket eltávolítjuk a szerszámból az adott műanyag kilökési hőmérsékletén. A termék lehűlése a kilökési hőmérsékletről szobahőmérsékletre szintén zsugort okoz, melyet a szerszámüreg növelésével lehet kompenzálni. Vagyis, ha a zsugor értékét 1%-nak feltételezzük, az azt jelenti, hogy a fröccsöntött termék a szerszámból való kilökést követően a hőmérsékletváltozás következtében 1%-ot veszít méretéből, tehát ha egy 100 mm-es terméket szeretnénk gyártani, az a fröccsöntés után csak 99 mm-es lesz. Tehát a fröccsöntő szerszámok tervezésekor mindig nagyobbra tervezzük a szerszámot a zsugor értékével, a méretpontosság érdekében. Az utónyomási szakasszal egyszerre elkezdődik a termék hűtése is.
- *Plasztikálás és hűtés.* Ebben a lépésben a következő fröccsöntési ciklushoz szükséges anyagmennyiség megömlesztése történik. **Plasztikálás** alatt a műanyag granulátum megömlesztését értjük, vagyis lecsökken a viszkozitás, és megnövekszik a folyási képesség. A plasztikálás hő hatására valósul

meg, vagyis a műanyag granulátumot fel kell melegíteni, hasonlóan az extrúziónál tárgyaltakhoz. A plasztikálás csak az előzőleg a szerszámba befröccsöntött termék lepecsételődése után veszi kezdetét. A műanyag termék hűtését a szerszámban kialakított hűtőjáratok segítik, melyek egy temperálóegységhez kapcsolódnak. A fröccsöntési ciklus leghosszabb szakasza a hűtési szakasz.

- *Fúvóka hátra.* Mikor a termék hőmérséklete eléri az adott műanyagnak megfelelő kilökési hőmérsékletet, a fúvóka, a fröccsegységgel, hátramozdul, így megszűnik a csatlakozás a szerszámmal.
- *Szerszámnyitás.* Miután a fröccsegység által gyakorolt erőhatás megszűnik, a szerszámot biztonságosan ki lehet nyitni.
- A termék kilökése a szerszámból a kilökőrendszer segítségével.

A ciklus befejeztével már készen áll a polimer ömledék a következő ciklusban gyártandó munkadarabok fröccsöntésére. A fentiekből látható, hogy a fröccsöntés szakaszos gyártás, az extrúzióval ellentétben, amely esetén folyamatosan gyártják az állandó keresztmetszetű terméket.

9.1.2. A fröccsöntő gép

Az iparban található fröccsöntőgépek a megjelenésüktől napjainkig nagy változáson mentek át. Ennek a változásnak az oka az automatizálás alkalmazása, ami a termelékenység növelését és a gyártott termékek méretpontosságát és minőségét biztosítja. Gyártótól függően a fröccsöntő gépek egyes részeinek kialakítása változik, így például a záróegység (mely a szerszám mozgatását és megfelelő erővel történő összezárását biztosítja) működtetése történhet villanymotorokkal vagy hidraulikusan. Funkcionalitás szempontjából a fröccsöntő gépeket két nagy egységre bontjuk:

- fröccsegység,
- záróegység.

A fröccsegység feladata a szilárd halmazállapotú granulátum (lehet műanyag vagy termoplasztikus elasztomer) folyékony, nagy viszkozitású, ún. ömledék állapotba hozni, majd ezt nagy nyomás alkalmazásával befröccsönteni a fröccsöntő szerszámba, ahol felveszi a szerszámban kialakított üreg alakját. A granulátum megolvasztása hővel történik.

A záróegység feladata a szerszám mozgatása, illetve annak összezárása megfelelő erővel, vagyis a **záróerő** felépítése és fenntartása a fröccsöntési ciklus alatt.

A fröccsöntési hőmérséklet a használt alapanyag függvényében változik, csak-

úgy, mint a használt csiga paraméterei. Az alapanyag anyagszerkezete szintén jelentős hatást gyakorol a fröccsöntési folyamatra. Egyes alapanyagokat, melyek hajlamosak jelentős vízfelvételre, szárítani kell a felhasználás előtt. A **9.1. táblázat** a tömeggyártásban használt műanyagok tipikus fröccsöntési hőmérsékletét mutatja be.

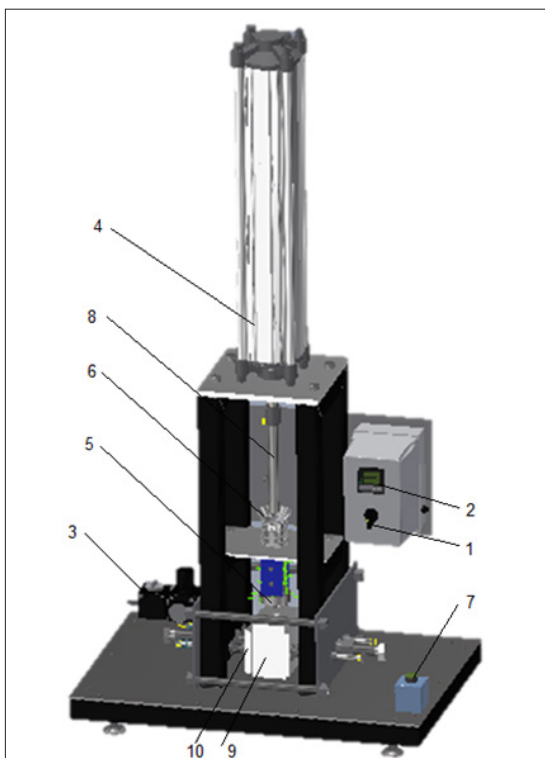
9.1. táblázat. *Tipikus fröccsöntési hőmérsékletértékek*

Anyag	Fröccsöntési hőmérséklet (°C)
LDPE	134–145
HDPE	200–260
PP	200–280
PS	160–240
IPVC	160–170
ABS	180–220
PA	260–320
PMMA	180–240
POM	180–230
PC	270–350

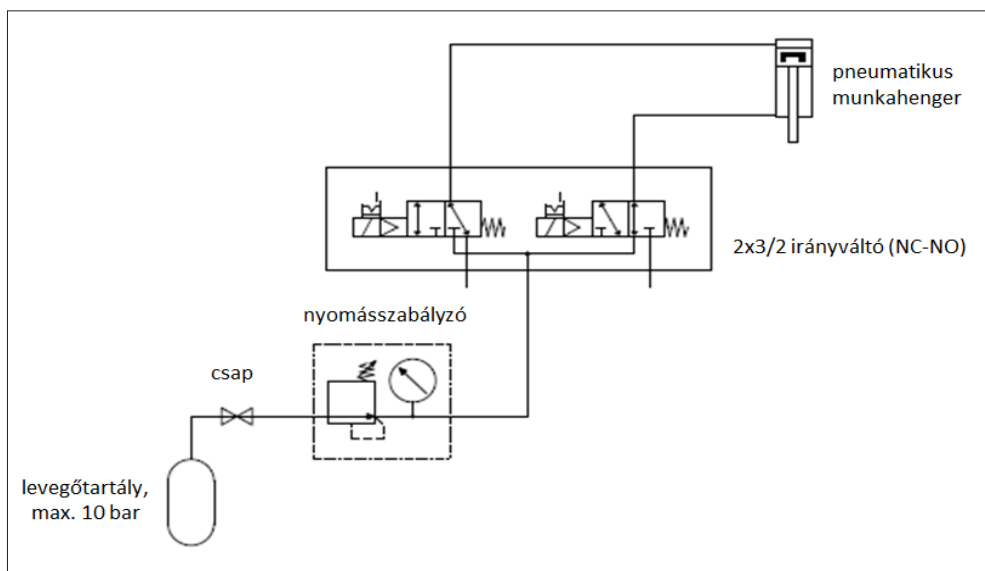
9.2. Egyedi tervezésű, pneumatikus fröccsöntő gép

A **9.1. ábrán** látható egy egyedi kialakítású fröccsöntő gép. A fröccsöntő gép egy államvizsga keretében valósult meg. A fő célkitűzések a gép tervezésekor elsősorban a fröccsöntés folyamatának bemutatására szolgáló didaktikai eszköz költséghatékony kialakítása volt. A gép alapkoncepcióját az első fröccsöntő gép adta, melyet a Hyatt testvérek fejlesztettek ki, és gőzzel működtettek.

A **9.1. ábrán** látható fröccsöntő gép működtetéséhez szükséges egy kompresszor, amely a kívánt nyomást biztosítja a pneumatikus munkahengernek. Az 1-es kapcsolóval lehet a berendezést üzembe helyezni. A fröccsöntést addig természetesen nem lehet elkezdni, amíg a kívánt hőmérsékletet és nyomást nem állítottuk be. A 2-es hőmérséklet-szabályzó segítségével beállíthatjuk a kívánt hőmérsékletet. A 3-as nyomásszabályzóval a 4-es pneumatikus munkahenger működtetéséhez kívánt nyomást tudjuk beállítani. Miután a henger, 5, hőmérséklete elérte a kívánt értéket, a műanyag granulátumot a 6-os tölcseren keresztül betöltjük az 5-ös hengerbe. A granulátum megömlése után, mely egy adott ideig történő melegítés hatására következik be, a 7-es nyomógomb lenyomásával és nyomva tartásával működésbe hozzuk a 4-es pneumatikus munka-



9.1. ábra. Egyedi tervezésű pneumatikus fröccsöntő gép



9.2. ábra. A fröccsöntő gép pneumatikus kapcsolási rajza

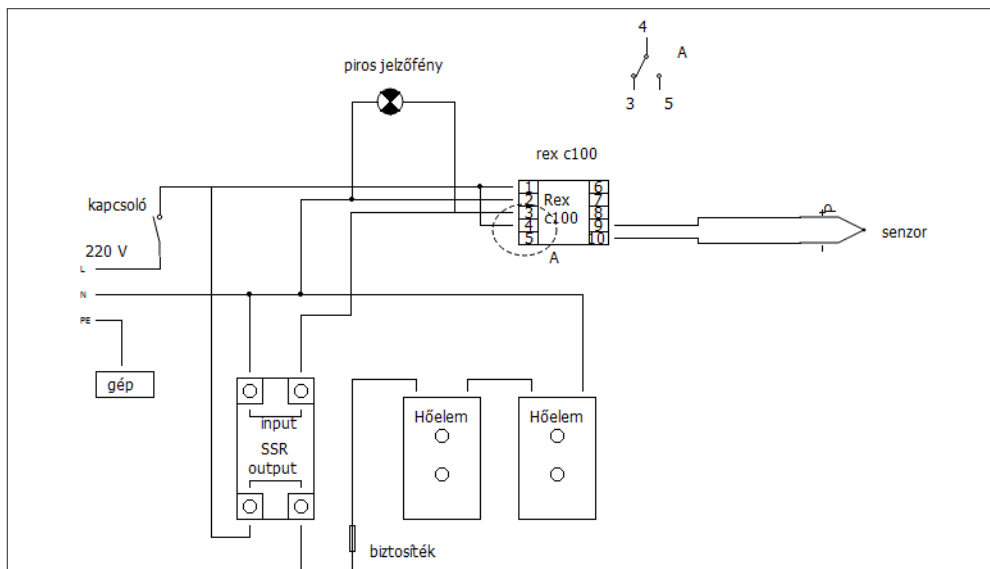
hengert, aminek hatására a 8-as rúd belepréseli a 9-es szerszámba a megolvadt műanyagot. Az utónyomási időt a 7-es nyomógomb nyomva tartásával tudjuk változtatni. A hűlési idő után a 9-es szerszámot kivesszük a 10-es záróegységből. A fröccsöntött terméket a szerszám kinyitása után eltávolíthatjuk.

A **9.1. ábrán** látható berendezés fröccsegysége a következő alegységekből épül fel:

- munkahenger
- rúd
- fúvóka
- pneumatikus egység
- termikus egység

A fúvóka a henger végére csavarkötéssel van rögzítve, csakúgy, mint a fűtőelemek, a garat és a hőmérséklet-érzékelő. A fúvóka szerszám felőli részén egy gömbfelületet alakítottunk ki, mely a fröccsegység és a szerszám pontos illeszkedését eredményezi, megakadályozva a fröccsöntés folyamata közben a műanyag ömledék szivárgását a két egység közt. A fröccsegység automatikus eltávolítását a szerszámtól egy rugó segíti elő.

A **9.2. ábrán** látható pneumatikus vezérlés biztosítja a pneumatikus munkahenger mozgását az egyik véghelyzetből a másik véghelyzetbe. A pneumatikus munkahenger alapállásban a belső véghelyzetben van, míg a 7-es nyomógomb



9.3. ábra. A fröccsöntő gép hőmérséklet-szabályzását megvalósító villamos kapcsolási rajz

lenyomásával a két útváltó szelep (3-as) kapcsolása megváltozik, és a pneumatikus munkahenger a külső véghelyzetébe kerül.

A fröccsegység hőmérséklet-szabályozását a **9.3. ábrán** látható elektromos kapcsolási rajz szemlélteti. A hőmérséklet-szabályozását egy REX c100-as szabályozó végzi, melynek a bemeneti jelét egy K-típusú hőmérsékletszenzor biztosítja, és a kimenetre kettő, egyenként 250 W-os fűtőelemrel segítségével kapcsolódik.

A **9.1. ábrán** látható fröccsöntő gép záróegységét a 10-essel jelölt fémlapok alkotják, melyek a fröccsöntés során biztosítják a megfelelő záróerőt.

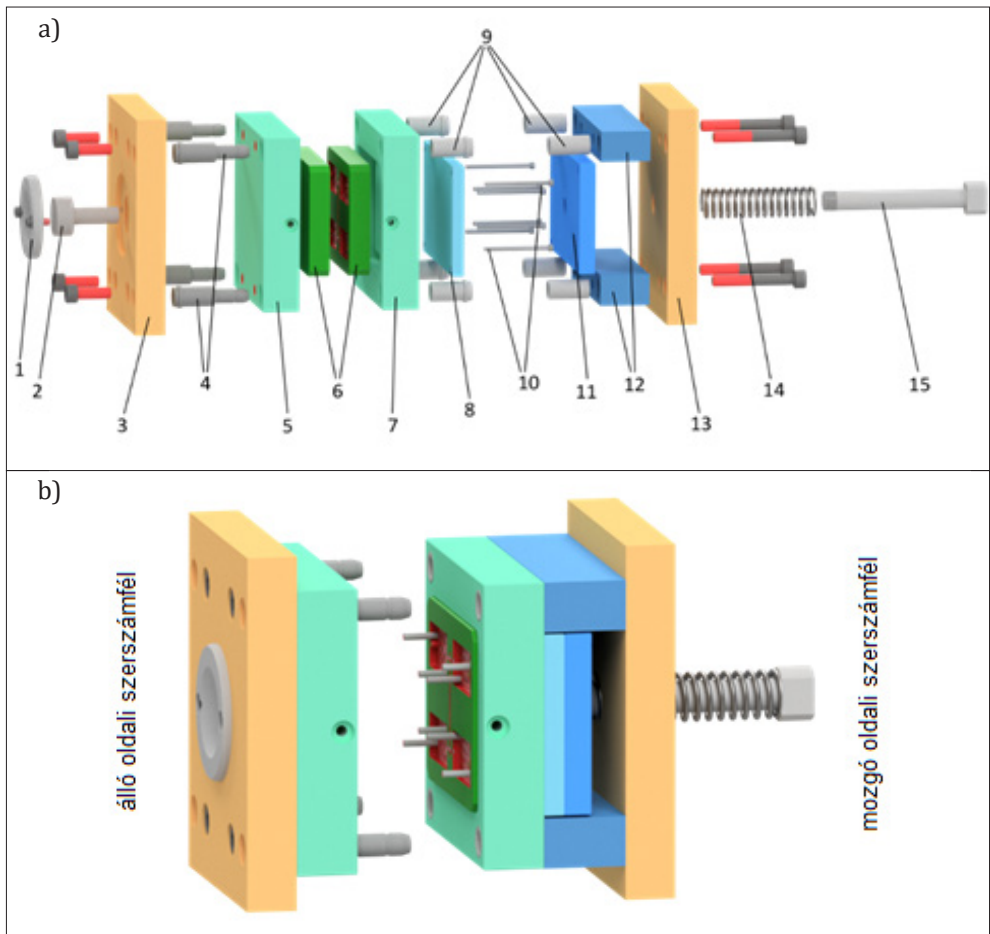
9.2.1. A fröccsöntő szerszám

A műanyag termék bonyolultságától függ a fröccsöntő szerszám komplexitása. A legegyszerűbb szerszámtípus az egy osztósíkú, kétlapos, hideg csatornás fröccsöntő szerszám; ez látható a **9.4. ábrán**.

A **9.4. ábrán** látható szerszám felépítésében szereplő alkatrészecskék a következők:

1. Központosító gyűrű
2. Beömlőpersely
3. Álló oldali felfogólap
4. Vezetőoszlop
5. Álló oldali formalap
6. Cserélhető betét
7. Mozgó oldali formalap
8. Kilökő tartólap
9. Vezetőhüvely
10. Kilökőcsap
11. Kilökőlap
12. Távtartó lap
13. Mozgó oldali felfogólap
14. Kilökőrugó
15. Fő kilökőcsap.

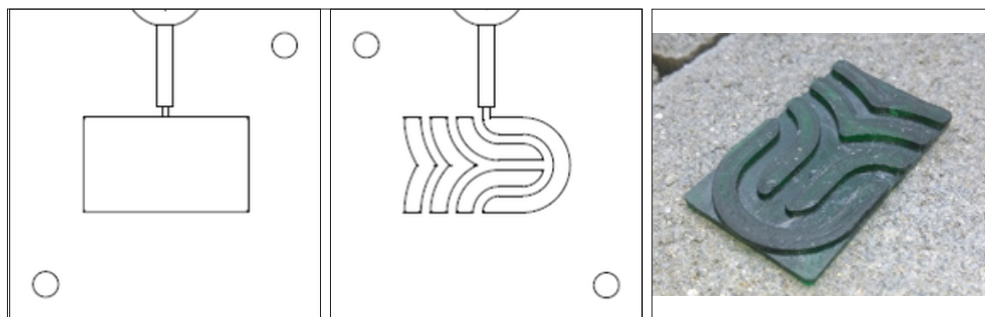
A fröccsöntő szerszámoknak azt az részét, mely a fröccsöntés idején nem mozog, álló oldali szerszámfélnek nevezzük. Ezzel ellentétben a szerszám azon részét, mely mozog, s ezáltal lehet a szerszámot zárni és nyitni, mozgó oldali szerszámfélnek nevezzük. Mindkét szerszámfélben található egy felfogólap, amely segítségével a szerszámot rögzíteni lehet a fröccsöntő géphez. Továbbá,



9.4. ábra. Egy osztósíkú, kétlapos, hideg csatornás fröccsöntő szerszám felépítése:
a) robbantott nézet és b) összeszerelt állapot.

mindkét szármfélben található egy-egy formalap, 5 és 7, illetve egyes esetekben betétek, 6, melyek cserélhetők, ezáltal egy szármfélhállyal több műanyag termék is gyártható a betétek cseréje esetén. A mozgó és álló oldali formalapok vagy betétek, érintkezési síkját nevezzük osztósíknak. A mozgó oldali szármfélben kap helyet általában a kilökörendszer, mely kilököcsapokból, 10, illetve a kilökö tartólapból, 8, és a kilökölaphból áll, 11. A távtartó lapok, 12, a kilökörendszer megfelelő működéséért felelnek.

A **9.4. ábrán** látható szerszám a legegyszerűbb felépítésű szerszámtípus, melyet egy fröccsöntő gépre felszerelhetünk. A **9.1. ábrán** látható fröccsöntő géphez viszont mégis túlságosan komplikált, hiszen ennél a fröccsöntő gépnél a



a)
9.5. ábra. a) Két formalapot tartalmazó fröccsöntő szerszám
 b) fröccsöntött termék

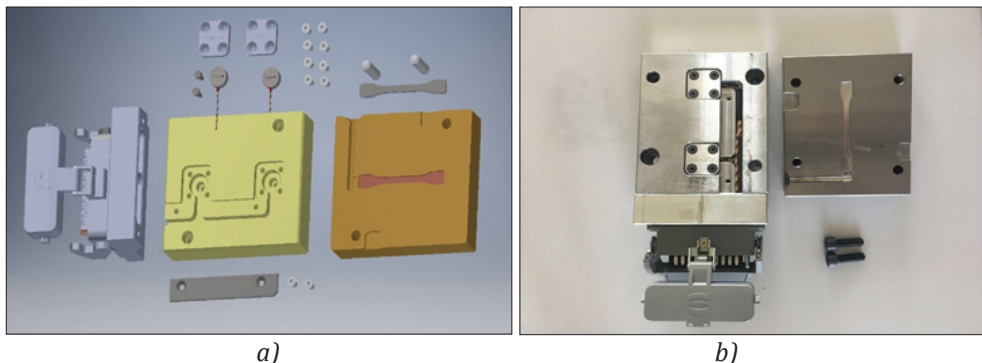
szerszámot nem tudjuk felfogni a fröccsöntő gépre, és a szerszámlapok mozgása is manuális, csakúgy, mint a termék eltávolítása a szerszámból. Így ezekre a funkciókra szolgáló egységeit a szerszámnak nélkülözhetjük, és tulajdonképpen csak a két formalapra van szükségünk. A **9.1. ábrán** látható fröccsöntő géphez a **9.5. ábrán** látható szerszámot használjuk.

A **9.5.a ábrán** látható a két formalap és a kialakított szerszámüreg, mely kitöltése révén a **9.5.b ábrán** látható Sapientia-logót kapjuk. Fontos kiemelni, hogy a szerszámüreg kialakítása mellett szükséges egy beömlőrendszer (jelen esetben egy furatból áll), amely a polimer ömledéket a fröccsegység fúvókájától a szerszámüregbe vezeti.

9.2.2. Az üregnyomásmérés

A fröccsöntött termékek méretpontosságának ellenőrzésére több megoldás létezik, viszont az üregnyomás mérése az egyik legmegbízhatóbb módszer. Ha az üregben kialakult nyomás egy adott határon kívül esik, vagy túlságosan lecsökken, vagy megnő, az visszajelzi a fröccsöntési folyamatban keletkezett hibát. Az üregnyomás mérése a **9.1. ábrán** szemléltetett fröccsöntő gépre adaptált szerszám a **9.6. ábrán** látható.

A szerszám úgy van kialakítva, hogy a használt nyomásmérő szenzoroknak helyet ad, illetve a precíz megmunkálást igénylő transzfercsapok is helyet kapnak. A transzfercsapokra azért van szükség, hogy a szerszámban kialakult nyomást továbbítani lehessen a nyomásmérő szenzorhoz, amit közvetlenül nem lehet beépíteni a szerszámüregbe. Az iparban használt fröccsöntő szerszámok esetén a nyomásszenzorokat a kilököcsapok és a kilökölap közé helyezik el, így



9.6. ábra. Az üregnyomásmérésre alkalmas fröccsöntő szerszám;
a) robbantott nézet és b) maga a kivitelezett szerszám

a szerszámban megjelent nyomást a csap továbbítja az érzékelőnek. A jeleket a nyomásmérő szenzoroktól a Cavity Eye Hungary Kft. (Kecskemét) rendszere segítségével tudjuk feldolgozni és kiértékelni.

9.3. Mérések

A gyakorlat során, LDPE-t használva, a következő feladatok elvégzése szükséges:

- A termék fröccsöntéséhez szükséges anyagmennyiség meghatározása. A használt fröccsöntési paraméterek: $T = 270\text{ °C}$, $p = 8\text{ bar}$, utónyomási idő $t = 3\text{ s}$. Kezdeti anyagmennyiség 1 g és 0,5 g-os lépésekben emeljük a használt granulátummennyiséget. A kimért alapanyag tömegét a fröccsöntött termék tömege függvényében mutató grafikon elkészítése szükséges.
- A szükséges anyagmennyiség meghatározása után a nyomás hatását vizsgáljuk a termékre: $p = 5, 6\text{ és }7\text{ bar}$ nyomást használva. $T = 270\text{ °C}$, $t = 3\text{ s}$. A nyomás = $f(\text{terméktömeg})$ grafikon elkészítése szükséges.
- A hőmérséklet hatását a fröccsöntött termék minőségére $T = 260, 270\text{ és }280\text{ °C}$ értékek esetében vizsgáljuk; $p = 8\text{ bar}$, utónyomási idő $t = 3\text{ s}$. A fröccsöntési hőmérséklet versus fröccsöntött termék tömege grafikon elkészítése szükséges.
- Az üregnyomás mérése $T = 270\text{ °C}$, $p = 8\text{ bar}$, utónyomási idő $t = 3\text{ s}$ technológiai paramétereket használva.

Minden fröccsöntött termék tömegét megmérjük.

10. VÁKUUMFORMÁZÁS

A gyakorlat célja a vákuumformázási folyamat gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai változók megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található vákuumformázó berendezés felépítésének és működési elvének megismerése.

10.1. Elméleti alapok

A vákuumformázás széles körben alkalmazott műanyag-feldolgozási technika. A vákuumformázással készített, nyitott üreget tartalmazó termékek palettája igen sokrétű, ami a csomagolóelemektől egészen a nagy ütésállóságú repülőgéppilótafülke-védőburkolatig terjed. Továbbá, az egészségügyben például a személyre szabott fogszabályzók gyártására is használják a vákuumformázást.

Amíg általában a granulátum vagy por az elsődleges nyersanyagforma a műanyagfeldolgozás-technikában, addig a vákuumformázás esetén műanyag lemez az előgyártmány. A felhasználástól függően a lemez vastagsága változik. A vákuumformázás a műanyag lemez felmelegítésével kezdődik egy adott hőmérsékletre, melyen a lemez képlékenyen alakítható. Nagyon fontos különbség az eddig tárgyalt műanyag-feldolgozási technikákkal szemben, hogy az előgyártmány nem ömlik meg, nem jön létre az ömledék, hanem a szilárd anyagot képlékeny állapotba hozzuk, így a formázás viszonylag kis erő alkalmazásával is megvalósítható. A felmelegített lemezt ezek után az alakadó, hideg szerszámra húzzák, majd vákuummal a szerszám (másként: forma) és a műanyag lemez közti levegőt eltávolítják. Hűtés hatására az alak berögzül, és a műanyag lemezt eltávolítják a formáról, s majd utólagos megmunkálást végeznek szükség szerint.

A vákuumformázás során az előzőekben említett ideális hőmérséklet, melyen a műanyag lemez képlékeny állapotban van, és könnyen formázható, megválasztását a használt polimer anyagszerkezete nagymértékben befolyásolja. Az amorf anyagok esetében a használható hőmérséklet-intervallum szélesebb,

mint a részlegesen kristályos polimerek esetén. Ez annak tudható be, hogy az amorf szerkezetű polimerek esetén az üvegesedési átmenet szélesebb hőmérséklet-tartományban megy végbe, mint a kristályok olvadása a részlegesen kristályos polimerekben. Ennek fényében a vákuumformázásra közkedveltebbek az amorf polimer anyagok. A részlegesen kristályos anyagok vákuumformázását csak a megadott szűk intervallumban végezhetjük el, hiszen, ha kisebb hőmérsékletet használunk, a kristályok nem olvadnak meg, és gátolják az alakadást. Ezzel ellentétben, ha túl nagy hőmérsékletet használunk, az anyag megömlik. Az amorf és a részlegesen kristályos polimerekre jellemző vákuumformázási hőmérséklet-tartományok a **10.1. táblázat**ban láthatók. Tanulmányozzuk az intervallum nagyságát az anyagszerkezet függvényében.

10.1. táblázat. *Amorf és részlegesen kristályos polimer anyagok vákuumformázási hőmérséklet-tartománya*

Amorf		Részlegesen kristályos	
Anyag	Hőmérséklet-tartomány (°C)	Anyag	Hőmérséklet-tartomány (°C)
PS	150–175	HDPE	150–17
ABS	150–180	LDPE	105–150
PMMA	130–170	PP	150–180
PC	170–205	POM	164–167
PVC	140–190		

A vákuumformázó berendezések a szerszám kialakítása szempontjából két-félék lehetnek:

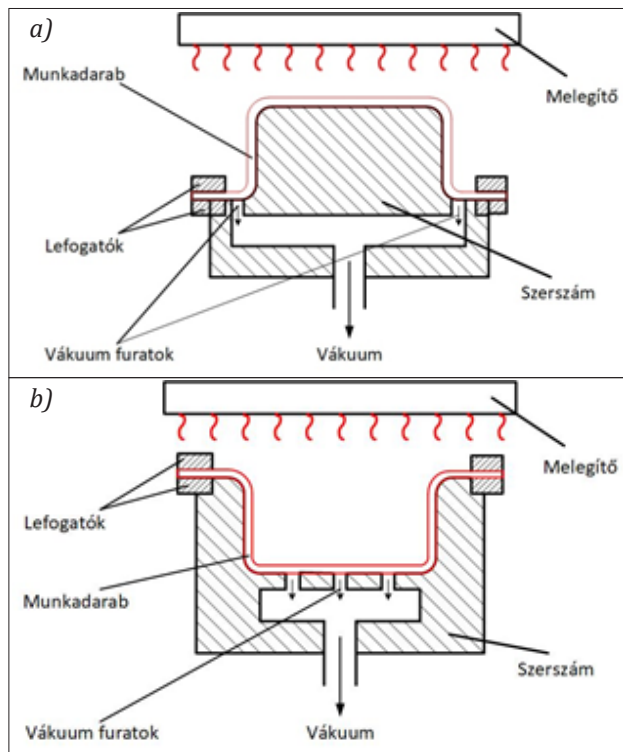
- pozitív szerszámmal történő formázás és
- negatív szerszámmal történő formázás.

Az **10.1. ábrán** a pozitív és negatív szerszámot használó vákuumformázó berendezés vázlata látható.

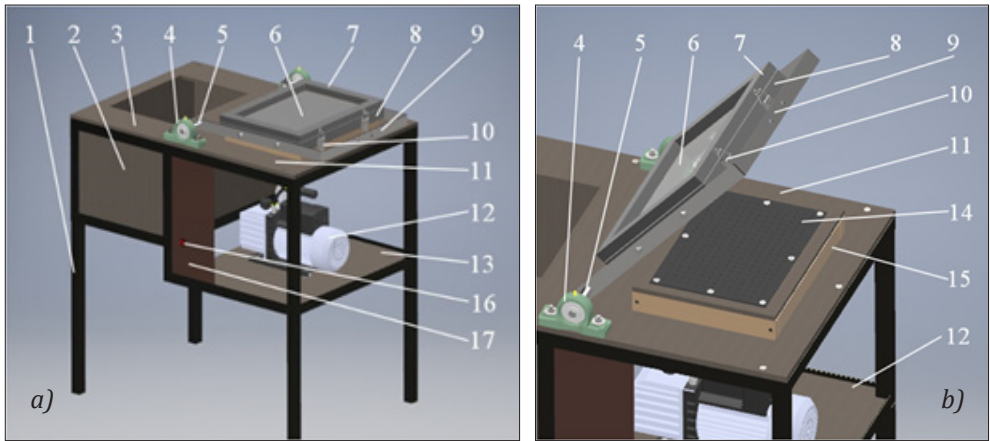
A pozitív szerszámos vákuumformázás esetén a szerszám a kialakítandó termék alakjának pozitívja, míg negatív szerszámos formázásnál a termék alakjának negatívja. Általánosan a negatív szerszámok kialakításának anyagszükséglete nagyobb. Az ábrán látható, hogy melegítés után a műanyag lemez a szerszámra rápréselődik, tehát a szerszám függőleges részén az megnyúlik. A lemez megnyúlása vastagságcsökkenéshez vezet. A nagy szintkülönbséget tartalmazó szerszámok esetén erre a jelenségre kiemelten figyelni kell. Továbbá megfigyelhető, hogy a terméknek azon része pontosabb, mely a szerszámmal érintkezik a formázás során. Így, pozitív szerszám esetén a termék belső fele,

míg negatív szerszám esetén a termék külső felén lévő méretek a pontosabbak. A vákuumformázás során a műanyagot felmelegítik, majd lehűl, aminek következtében fajlagos térfogatváltozás jelentkezik, vagyis a termék a formázás után zsugorodni fog. Ennek értelmében a termék a pozitív szerszámmra rázsugorodik, megnehezítve az eltávolítást, míg a negatív szerszámban összezsugorodik, és így könnyebben el lehet távolítani.

Fontos kiemelni a hőmérséklet-eloszlás fontosságát a végtermék méretpontosságának megtartása érdekében. A lemez felmelegítése és a felület egyenletes hőmérsékleten tartása kritikus az egyenletes zsugor kialakításához. Ennek érdekében a fűtőegység mérete és teljesítménye lényeges szerepet játszik. Hasonló mondható el a szerszám hőmérsékletéről is, hiszen, ha hőmérséklet-gradiens alakul ki a szerszám felületén, az egyenetlen alakváltozáshoz és zsugorhoz vezet, ami a termék vetemedését eredményezi. Mivel a polimerek hőszigetelők, ezért a lemez vastagsága függvényében kell meghatározni a melegítési hőmérsékletet és a melegítési időt. A vastag lemezek esetén kétoldali melegítést használnak.



10.1. ábra. a) Pozitív és b) negatív szerszámot használó vákuumformázás



10.2. ábra. A vákuumformázó berendezés 3D-s modellje szerkezeti elemekre bontva.
 1 – vázszerkezet, 2 – melegítőegység doboza, 3 – melegítőegység fedőlapja, 4 – csapágy csapágyházzal, 5 – tengely, 6 – műanyag előgyártmány, 7 – felső befogókeret, 8 – alsó befogókeret, 9 – fogantyú, 10 – szorítókampók, 11 – vákuumdoboz tartólapja, 12 – vákuumszivattyú, 13 – vákuumszivattyú tartólapja, 14 – perforált tartólap, 15 – vákuumdoboz, 16 – kapcsoló, 17- kapcsoló tartópanelje

10.2. Egyedi tervezésű vákuumformázó berendezés

Az **10.2. ábrán** egy egyedi tervezésű, vákuumformázó berendezés látható. A berendezés két részre bontható: a melegítő rész és a formaadó rész. A megmunkálás a műanyag lemez befogásával kezdődik a 7-es és 8-as keretek közé. Erre a lépésre a kezelhetőség és a lemez kezdeti méreteinek, hosszúság és szélesség, megőrzése érdekében van szükség. A 9-es forgatható keretet első lépésben a berendezés bal oldalára fordítjuk, hiszen itt található a melegítőegység. A melegítés a melegítő bekapcsolásával veszi kezdetét. A megfelelő hőmérséklet elérése után a 9-es keretet a berendezés jobb oldalára fordítjuk, ahol a szerszám egy perforált lemezen, 14, helyezkedik el. A felmelegített műanyag lemezt rápréselve a szerszámmra, és vákuumot alkalmazva (a 12-es vákuumszivattyú segítségével) a szerszám és a lemez közti levegő eltávolítható, aminek a hatására a lemez felveszi a szerszám alakját. A hűtés után eltávolítjuk a lemezt a keretből, és esetleges megmunkálásokat végezhetünk.

10.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- A melegítési idő meghatározása. A kísérlethez 0,5 mm vastagságú PC-lemezt

használva adott szerszám esetén a lemezt melegítjük 1 percre, majd elvégezzük az alakadási fázist. A melegítési időt 0,5 perces lépésekkel növeljük, míg a lemez megfelelően felveszi a szerszám alakját. A vákuumszivattyút tehát 1 percre működtetjük. A vákuumformázott lemez vastagságát mérjük, mikrométerrel, a termék függőleges és vízszintes részein, és összehasonlítást végzünk.

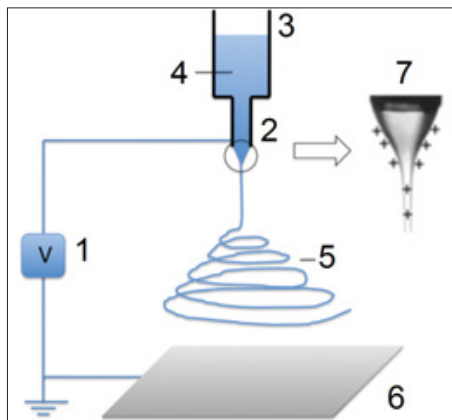
- A vákuum alkalmazási időtartamának optimalizálása. Az optimális hőmérsékleten, a vákuum alkalmazásának időtartamát optimalizáljuk, 30 másodpercről kezdve, majd 15 másodperccel növelve ezt mérésenként. A vákuumformázott lemez vastagságát mérjük a termék függőleges és vízszintes részein, és összehasonlítást végzünk.

11. ELEKTROSZTATIKUS SZÁLKÉPZÉS

A gyakorlat célja az elektrosztatikus szálképzési folyamat gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai tényezők megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található elektrosztatikus szálképző berendezések felépítésének és működési elvének megismerése.

11.1. Elméleti alapok

A polimer nanoszálak (átmérő $< 1 \mu\text{m}$) nagy figyelmet kaptak az elmúlt évtizedekben a nagy felület per térfogat arányból származó tulajdonságaik miatt. Alkalmazási potenciáljuk széles körű: szűrők, gyógyszerkészítmény, orvosi alkalmazások, szenzorok, napelemek, kompozit anyagok erősítőszálai, katonai ruházat stb. A nanoszálak előállítására az elektrosztatikus szálképzési (angolul: electrospinning) eljárást használja a nemzetközi kutatók zöme a relatíve olcsó, flexibilis felépítés és az egyszerű használata miatt. Az elektrosztatikus szálképzés az elektrosztatikus erőt használja a szálképzéshez.



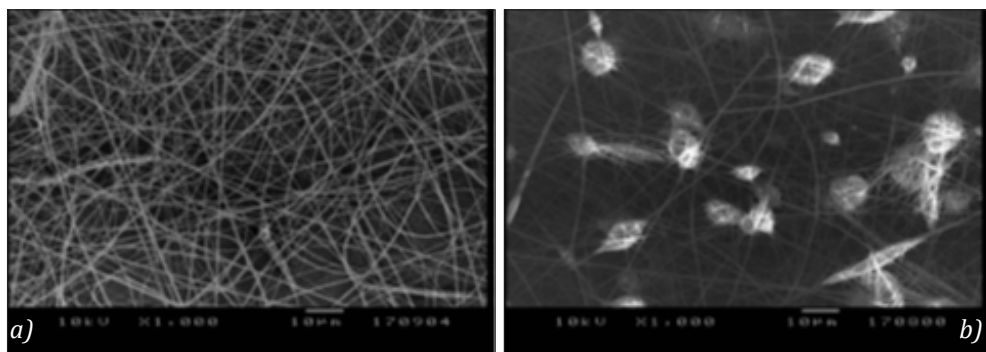
11.1. ábra. Polimer szálak előállítása elektrosztatikus szálképzési eljárással.
 1: nagyfeszültségű tápegység, 2: szálképző elektróda (kapilláris), 3: oldatadagoló,
 4: szálképzési folyadék, 5: szálképzési térrész, 6: szálgyűjtő (földelt),
 7: Taylor-kúp, vagyis a kapillárisból kilépő folyadék deformált alakja

A **11.1. ábra** egy elektrosztatikus szálképző berendezés vázlatát mutatja. A berendezésnek 3 fő komponense van: egy egyenáramú áramforrás, egy tartály, mely a polimer oldatot tartalmazza, és egy kis átmérőjű nyílásban végződik, valamint egy szálgyűjtő, mely a polimer szálak felfogásáért felelős. Az eljárás működése közben a nagyfeszültségű áramforrást az elektromosan töltött folyadéksugár létrehozására használják. Mielőtt a folyadéksugár a szálgyűjtőre érne, az oldószer elpárolog, és a szálgyűjtőn a megszilárdult nano- és mikrométer-tartományba eső átmérőjű polimer szálak egy porózus hálót képeznek, amelyet a **11.2. ábra** szemléltet.

A polimer oldatot tartalmazó tartályból, amely az esetek nagy többségében egy fecskendő, egy vezetéken keresztül az oldat eljut a cső végén található injekciós tűbe. A tű (jelen esetben ez egy kapilláris) pozitív, míg a szálgyűjtő negatív vagy földpotenciálra van kapcsolva. A polimer oldatban a pozitív potenciál hatására pozitív töltések jelennek meg. Az **11.1. ábra** mutatja a tű végén kialakult, ún. Taylor-kúpot, melynek felületén a pozitív töltések taszítják egymást. A feszültség növelésével a pozitív töltések közti taszítóerő is tovább növekszik. Egy folyadéksugár jön létre, amikor a töltések közti taszítóerő által létrejött mechanikai feszültség az oldatban meghaladja az oldatnak ama felületi feszültségét, amely a tű hegyén található folyadékcsepp felszínén értelmezhető. Amíg a polimer oldat a tű hegyétől a szálgyűjtőig elér, az oldószer nagy része elpárolog, és a szál az instabilitásból eredő ostorozó mozgás hatására megnyúlik, így képezve az akár nanométer nagyságrendű átmérőjű polimer szálakat.

Az elektrosztatikus szálképzés technológiai változói közé tartoznak:

- az alkalmazott potenciálkülönbség, V (kV)
- a szálgyűjtő és a kapilláris közti távolság, D (mm)



11.2. ábra. Újrahasznosított PET-palackból előállított a) porózus szálak szövődék pásztázó elektron-mikroszkópos felvétele és b) a szálon jelentkező hibák, gömbök

- a polimer oldat térfogatárama, F (mL/h)
- a kapilláris belső átmérője, ID (mm)
- a polimer oldat koncentrációja, tömeg-arány százalékban

Ezenfelül az elektrosztatikus szálképzést befolyásolják a környezeti tulajdonságok: a hőmérséklet és a páratartalom, az oldat villamos vezetőképessége, a használt polimer molekulatömege és molekulatömeg-eloszlása, az adalékanyagok jelenléte, a polimer oldat felületi feszültsége stb.

A **11.2. ábrán** látható szálakat az átmérővel jellemzik, melynek a mérését többek között az ingyenesen elérhető ImageJ programmal lehet elvégezni, a szálról készül fényképen. A szálak átmérőjét minimum 100 mérésből határozzuk meg, amihez a minta 3 különböző részéről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételt használjuk.

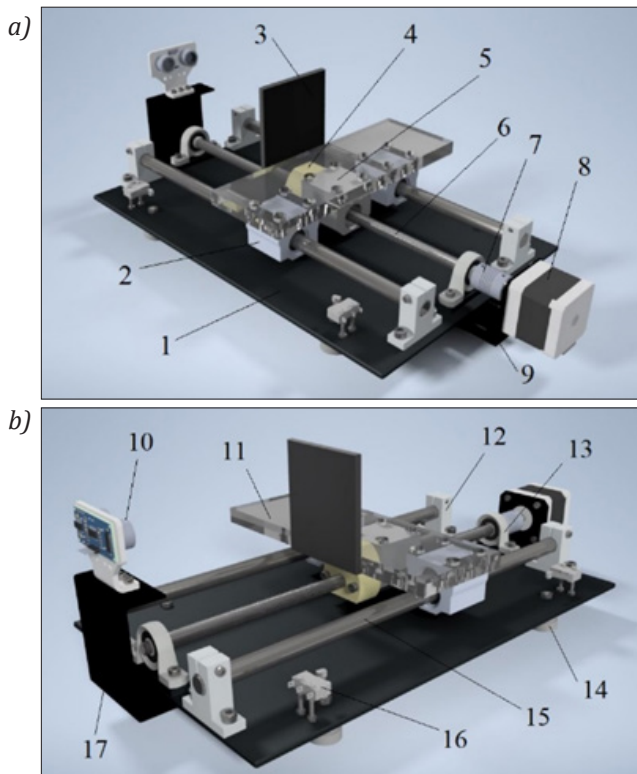
11.2. Egyedi tervezésű mozgatóberendezés

Az elektrosztatikus szálképzés során keletkezett polimer szálak szövédék gyűjtési területe korlátozott, és általában, a szálgyűjtő-kapilláris távolság függvényében 50–150 mm átmérőjű kört fed le. A létrehozott, szálak szövédék területének növelésére a következő megoldások léteznek:

- a kapilláris helyzetének változtatása,
- a kapillárisok számának növelése,
- forgó vagy futószalag-típusú szálgyűjtő használata.

A kapillárisok számának növelése magával vonja, hogy nagyobb területet lehet beborítani az elektrosztatikus szálképzési eljárás során keletkezett, véletlenszerűen elhelyezkedő szálak szövédékekkel. Ez a módszer a termelékenység növelésére is alkalmas, és alkalmazták is, viszont a kapillárisok számának növelésével nagyobb elektromos potenciál alkalmazása szükséges, illetve működtetése is bonyolultabb. Emiatt ezt a megoldást sem a keletkezett szálak szövédék területének növelésére, sem a termelékenység növelésére nem használják.

A **11.3. ábrán** egy egyedi tervezésű, az elektrosztatikus szálképző berendezés kiegészítő kapillárisának, a tűnek, a mozgatóegysége látható. A kiegészítő berendezés feladata: adott sebességgel mozgatni a kapillárist meghatározott távolságon vízszintesen oszcillálva. A berendezés technológiai változói a távolság, illetve a fordulatszám, melyből sebességet lehet számolni. E két változó értelmében a berendezés addig végzi a vízszintes oszcillálómozgást, míg le nem állítjuk. A maximális távolság vagy amplitúdó, 160 mm, míg a fordulatszám 150 és 300 1/min között változhat.



11.3. ábra. Az elektrosztatikus szálképző kapillárismozgató berendezése:
 1: váz, 2: lineáris csapágy, 3: ultrahang-visszaverő elem, 4: PA-csavaranya,
 5: PA-csavaranyához kapcsolt ház, 6: orsó, 7: tengelykapcsoló, 8: léptetőmotor,
 9: tartólap, 10: ultrahangos szenzor, 11: PC-lap, 12: tartóelem, 13: csapágy,
 14: gumitalp, 15: precíziós tengely, 16: végálláskapcsoló, 17: tartóelem

A berendezés a 8-as léptetőmotor forgómozgását egy tengelykapcsoló, 7, két lineáris csapágy, 2, és egy trapézmenettel ellátott orsócsavaranya (6-4) mechanizmussal alakítja át lineáris mozgássá. A kapilláris, mely pozitív potenciálon van a szálképzési folyamat alatt, az elektromosan szigetelő 11-es PC-lapra van erősítve, ami az 5-ös elem segítségével csatlakozik a 4-es csavaranyához. A motor forgása következtében a csavaranya lineáris mozgást végez, így az ehhez csatolt elemek is. A berendezés tervezésekor fontos szempont volt a flexibilis állítási lehetőség, így a 160 mm-es távon, a kapilláris mozgásának kezdeti és végpontja állítható. Az ultrahangos távolságmérő, 5-ös, és a 3-as elem biztosítja egy Arduino-mikrokontrollerrel vezérelve, hogy a mozgóplatform, 11, mindig az adott határok között tartózkodjon. A berendezés végálláskapcsolókkal van ellátva, a biztonságos működtetés érdekében.

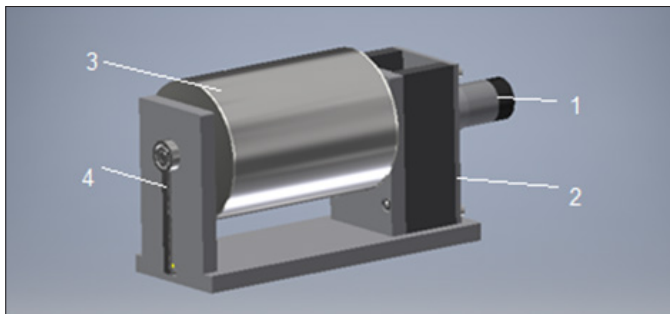
A bemeneti értékek és a berendezés kezelésére a billentyűzet gombjainak a következő funkciók felelnek meg:

- „*” – alapesetben a motor megállításáért/indításáért felel, ha egy értéket kell bevinni, akkor a tizedespont szerepét tölti be,
- „#” – értékek jóváhagyása,
- „A” – motor mozgásirányának manuális megváltoztatása,
- „B” – a mozgóplatform kezdeti és a végpontjainak megadása,
- „C” – nullapont-korrigálás,
- „D” – fordulatszám megadása.

11.3. Egyedi tervezésű, forgódobos szálgyűjtő

A szálás szövedékek területének növelése érdekében a forgódobos szálgyűjtőt előszeretettel használják, mivel egyszerű a felépítése és a kezelése is. A **11.4. ábrán** egy egyedi tervezésű, forgódobos szálgyűjtő látható, melynek az átmérője 115 mm, és 160 mm a hossza. A rozsdamentes acélból készült forgó szálgyűjtőt, 3-as, a fordulatszám-csökkentővel ellátott szervomotor, 1-es, hajtja meg tengelykapcsoló segítségével. A berendezés váza PC-lapok összecsavarozásával készült. A berendezés földpotenciálra a 4-es elemen keresztül kapcsolható. A berendezés 5–500 1/min fordulatszám-tartományban képes megbízhatóan működni. A forgódobos kollektor vezérlése Arduino-mikrovezérlővel történik, valamint a bemeneti értékeket a kijelzőn és a billentyűzeten keresztül adhatjuk meg.

A berendezés indításához először a forgásirányt kell megadni a billentyűzeten, majd a fordulatszámértéket kell jóváhagyni a „#” gombbal. A kollektor forgómozgását a „*” gombbal lehet leállítani.



11.4. ábra. Forgódobos kollektor:

1 – elektromos szervomotor, 2 – PC-vázszerkezet, 3 – rozsdamentes acélból készült, forgó szálgyűjtő, 4 – a földelés csatlakoztatására szolgáló elem

11.4. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- PVP-oldat készítése. A használt PVP molekulatömege $M_n = 30\,000$ g/mol. 5 mL 40% m/m koncentrációjú PVP-oldatot vízben való feloldással készítünk elő.
- Vizsgáljuk az alkalmazott potenciálkülönbség hatását a gyártott szálak átmérőjére. A kísérletekhez használt technológiai változók: $F = 1$ mL/h, $D = 100$ mm, $ID = 0,8$ mm, $V = 15, 20$ és 25 kV. A szálképzési folyamatot 1 percre végezzük minden esetben.
- Vizsgáljuk a kapilláris-kollektor távolság hatását a keletkezett szálak átmérőjére. A kísérletekhez használt technológiai változók: $F = 1$ mL/h, $V = 20$ mm, $ID = 0,8$ mm, $D = 100, 150$ és 200 mm. A szálképzési folyamatot 1 percre végezzük minden esetben.

A keletkezett szálak szövédékekről pásztázó elektron-mikroszkópos felvételek alapján, az ImageJ programot használva, meghatározzuk a gyártott polimer szálak átmérőjét 100 mérést használva minden esetre. A kapott átlagos átmérőket a tanulmányozott paraméter, V vagy D , függvényében ábrázoljuk ($d - V$ és $d - D$).

Az optimális feltételek meghatározása után, a kapillárismozgató berendezést és a forgódobos szálgyűjtőt használjuk egy nagyobb területet beborító szálak szövédékek előállítására.

12. CENTRIFUGÁLIS SZÁLKÉPZÉS

A gyakorlat célja a centrifugális szálképzési folyamat gyakorlati bemutatása, a folyamattal kapcsolatos technológiai tényezők megismerése és tanulmányozása. Továbbá, cél a laboratóriumban található centrifugális szálképző berendezés felépítésének és működési elvének megismerése.

12.1. Elméleti alapok

A szálas szövedékek előállításának és tanulmányozásának legelterjedtebb módja az elektrosztatikus szálképzési eljárás. Az elektrosztatikus szálképzési eljárás előnyei közé tartozik az egyszerű kezelhetőség, flexibilis felépítés és relatíve kis költségek. Ezzel szemben viszont, a kis termelékenység, 0,01–0,5 g/h kihozatal, az elektromosan vezető polimer oldat szükségessége és a folyamat során használt nagy elektromos potenciál használatával járó veszélyek jelennek meg hátrányként.

A termelékenység, vagyis a kihozatal, növelésére több megoldást fejlesztettek ki, melyek az előző fejezetben említett Taylor-kúpok számát növelik egy nagy oldatfelszín alkalmazva, így elérve ~10–200 g/h-t. Ezeket az eljárásokat tű nélküli, elektrosztatikus szálképzési eljárásnak nevezik. A nagy oldatfelszín használata viszont magával vonja a polimer oldat összetételének és koncentrációjának változását, mely a szálképzési folyamatot befolyásolja. Az egykapillárisos, elektrosztatikus szálképzési eljárások termelékenysége kicsi, és elektromosan vezető polimer oldatot feltételez. Ezenkívül a tű nélküli elektrosztatikus szálképzési eljárások, berendezések felépítése összetett, drága, és a megnövekedett villamos feszültség használata jelentős veszélyforrás.

A centrifugális szálképzési eljárást nanoszálak előállítására a tudományos szakirodalom szerint a 2010-es években kezdték el használni. A centrifugális szálképzési eljárás működése során centrifugális és Coriolis-erők jelennek meg, melyek a szálak előállítását teszik lehetővé. A forgómozgás következtében a polimer oldat egy kapillárison áramlik ki, létrehozva egy polimeroldat-sugarat,

mely egy szálgyűjtő felé halad a centrifugális erő hatására. A folyamat során a polimeroldat-sugárból az oldószer elpárolog, és a megszilárdult polimer nanoszál a szálgyűjtőn halmozódik fel. Az eljárás egyszerűségéhez már laboratóriumi méretek mellett is nagy teljesítmény társul, 60 g/óra kapillárisonként.

A centrifugális szálképzés során a forgófejet villanymotor hajtja meg, melynek a fordulatszámát szabályozni kell. Az esetek nagy többségében a kollektort sugárirányban elhelyezett, függőleges fémrudak alkotják. Az eljárás nagy termelékenysége mellett nem igényli a polimer oldat vezetőképességét, illetve az elektrosztatikus szálképzési eljárásoknál használt nagyfeszültség sem szükséges. Továbbá szintén az eljárás előnyeikhez sorolható, hogy kevésbé érzékeny a levegő páratartalmára, mint az elektrosztatikus eljárás. A fent említett okok miatt az eljárás nagyon ígéretes a szálak szövődékek előállítására.

A nanoszálak előállítására használt, centrifugális szálképzési eljárásról a tudományos szakirodalomban a 2010-es években kezdtek el bővebben publikálni, de ezelőtt is jelentek meg már tanulmányok. Akárcsak az elektrosztatikus szálképzéssel, ezzel az eljárással is lehet mind oldatból, mind ömledékekből szálakat előállítani. Az elektrosztatikus és centrifugális szálképzési eljárásokat összehasonlítva a keletkezett szálak átmérője szempontjából, a szakirodalomban azt találjuk, hogy habár általában az elektrosztatikus módszer kisebb szál-átmérőket termel ugyanarra az anyagra, a különbség átlagban mindössze 10%. A centrifugális szálképzési eljárás esetén a keletkezett polimer szál átmérőjét a következő tényezők befolyásolják:

- a fej fordulatszáma,
- a polimer oldat koncentrációja,
- a kapilláris, azaz a tű, hossza, amelyen a folyadék távozik a forgófejből,
- a kapilláris átmérője,
- a kapilláris-kollektor távolság.

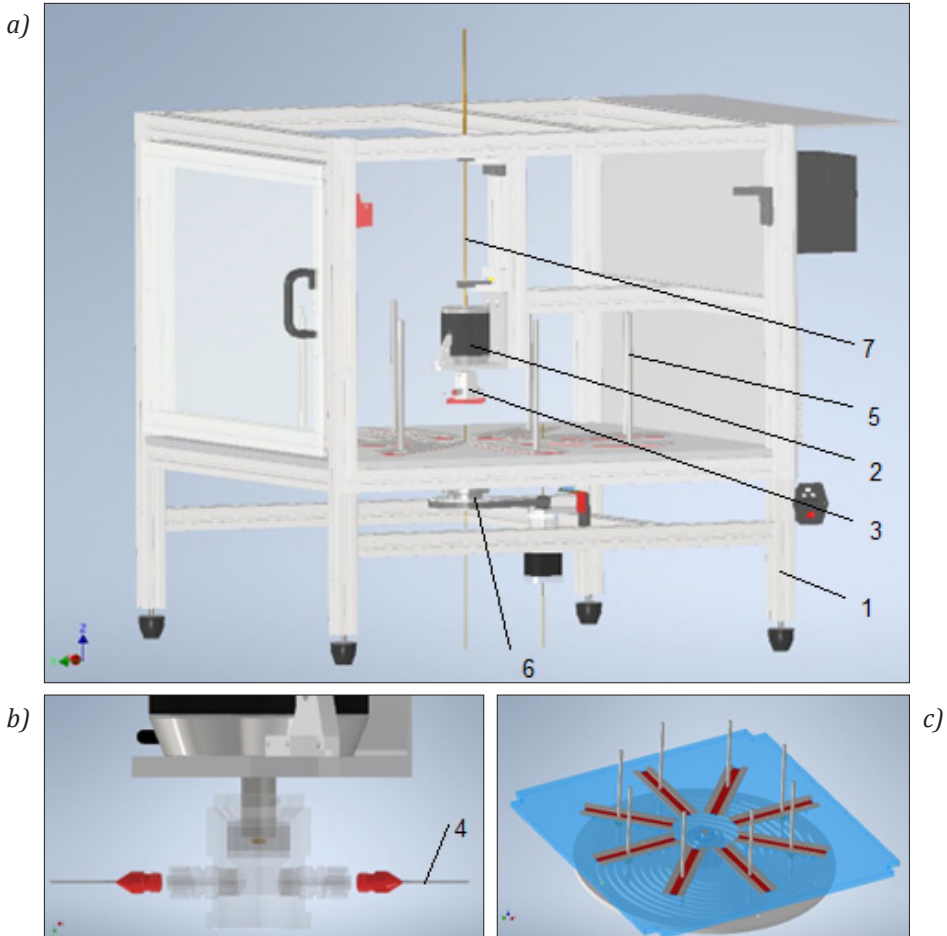
A fent említett technológiai tényezők kapcsán elmondható, hogy a fordulatszám növelése és a polimer oldat koncentrációcsökkenése, a kisebb átmérőjű kapilláris alkalmazása és a kapilláris-kollektor távolság növelése a keletkezett polimer szál átmérőjét csökkentik.

12.2. Egyedi tervezésű centrifugális szálképző berendezés

A **12.1. ábrán** egy egyedi tervezésű szálképző berendezést láthatunk. A berendezéssel szemben állított követelmények: a polimer oldat folytonos adagolási lehetősége, egy megfelelően nagy munkatér kialakítása, relatíve nagy fordulat-

latszám biztosítása, $\sim 15\,000\,1/\text{min}$ és költséghatékony kivitelezés voltak.

Nagyon fontos kiemelni, hogy habár több kutatócsoport is tanulmányozza a centrifugális szálképzés folyamatát, csak kevés esetben találkozunk a polimer oldat folytonos adagolására képes berendezéssel. Az esetek nagy többségében adagokban lehet a szálakat előállítani a centrifugális szálképző berendezésekkel. Ebben az esetben a forgófejbe helyezik a polimer oldatot, majd annak forgatásával, amíg van polimer oldat, szál képződik. Ezzel ellentétben a folyamatos oldatadagolás folyamatos szálképzést tesz lehetővé, ami a szálak minősége és a termelékenység szempontjából előnyösebb.



12.1. ábra. Az egyedi tervezésű centrifugális szálképző berendezés 3D-s modellje:
 1 – váz, 2 – egyenáramú villanymotor, 3 – forgófej, 4 – szálgyűjtő, 5 – szálgyűjtőrúd,
 6 – szálgyűjtőmozgató mechanizmus, 7 – vezetékek

A **12.1. ábrán** látható berendezés hasznos munkatere $640 \times 640 \times 430 \text{ mm}^3$. A berendezés vezérlése PLC-vel valósult meg, így biztosítva az ipari megbízhatóságot. A 3-as forgófejet a 2-es háromfázisú, kefe nélküli szinkronmotor hajtja meg, 0–15000 1/min fordulatszám-tartományban. A polimeroldat-sugár a 4-es kapillárison távozik a forgófejből. A polimer oldat folyamatos adagolása egy pumpa használatával a 7-es vezetéken keresztül valósul meg. A 7-es vezeték elhelyezése érdekében a motor tengelyén egy furat van kialakítva. A keletkezett polimer szálak a centrifugális erő hatására az 5-ös szálgyűjtő rudakon halmozódnak fel. A szálgyűjtő rudak egy kör mentén (**12.1c ábra**) helyezkednek el, melynek átmérője 200–500 mm-es tartományban változtatható. A szálgyűjtő rudak pozícióját sugárirányba a 6-os mechanizmus segítségével lehet változtatni. A rudak helyzetváltoztatásáért egy léptetőmotor felelős fogaskerék-hajtás alkalmazásával.

A centrifugális szálképző berendezés teljesen automatizált, és egy, a PLC-hez tartozó felhasználói felülettel lehet működtetni. A F1 nyomógomb lenyomásával a kijelző a **12.2. ábrán** látható konfigurációra tér vissza. Az F2 nyomógomb a szálgyűjtő rendszer vezérlésére alkalmas felületet jeleníti meg, ahol a szálgyűjtő pillanatnyi pozíciója látható, illetve a kívánt pozíció is beállítható. Továbbá, a szálgyűjtő rudak helyzetének manuális állítására is van lehetőség. Az F3 nyomógomb a hőmérséklet és páratartalom megjelenítésére alkalmas. Az F4 nyomógomb segítségével érjük el a forgófej fordulatszámának állítási lehetőségét.



12.2. ábra. A PLC felhasználói felülete

12.3. Mérések

A gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

- PVP-oldat készítése. A használt PVP molekulatömege $M_n = 30\,000$ g/mol. 15 mL 20%-os, illetve 15 mL 30%-os koncentrációjú PVP-oldatot vízben való feloldással készítünk elő.
- Vizsgáljuk a forgófej fordulatszámanak hatását a gyártott szálak átmérőjére. A kísérleti feltételek: tömegrészarány = 20%, $F = 30$ mL/h, $ID = 0,55$ mm, $D = 350$ mm, $n = 3000, 4000, 5000$ és 6000 1/min. A szálképzési folyamatot 5 percig végezzük minden esetben.
- Vizsgáljuk a koncentráció hatását a keletkezett szálak átmérőjére. A kísérleti feltételek: tömegrészarány = 30%, $F = 30$ mL/h, $ID = 0,55$ mm, $D = 350$ mm, $n = 3000, 4000, 5000$ és 6000 1/min. A szálképzési folyamatot 5 percig végezzük minden esetben.

A keletkezett szálak szövédékekről, pásztázó elektron-mikroszkópos felvételek alapján, az ImageJ programot használva, meghatározzuk az előállított polimer szálak átmérőjét, 100 mérést használva minden esetre. A kiszámolt átlagos átmérőket, d , az n függvényében ábrázoljuk a polimer oldat koncentrációját figyelembe véve.

JELÖLÉSEK

ABS	akrilnitril-butadién-sztirol
HDPE	nagy sűrűségű polietilén
LDPE	kis sűrűségű polietilén
PA	poliamid
PC	polikarbonát
PET	poli(etilén-tereftalát)
PMMA	poli(metil-metakrilát)
POM	polioximetilén
PP	polipropilén
PS	polisztirol
PVC	poli(vinil-klorid)
PVP	polivinil-pirrolidon
T	hőmérséklet
T_g	üvegesedési hőmérséklet
T_m	olvadási hőmérséklet
n	fordulatszám vagy folyási kitevő
\dot{V}_e	kihozatal
t	idő
DS	kifolyási duzzadás
p	nyomás
V	potenciálkülönbség
D	kollektor–kapilláris távolság
F	polimer oldat térfogatárama vagy erő
ID	kapilláris belső átmérője
d	polimer szál átmérője
PLC	programozható logikai vezérlő

MFR	folyási mutatószám
MVR	térfogatra vonatkoztatott folyási mutatószám
η	viszkozitás
$\dot{\gamma}$	alakváltozási sebesség
τ	nyírófeszültség
σ	mérnöki feszültség
η_a	látszólagos viszkozitás
m	tömeg
ρ	sűrűség
A_0	kiindulási terület
ε	megnyúlás
L	hosszúság
L_0	kezdeti hosszúság
E	húzási rugalmassági modulus, Young-modulus
v	vizsgálati sebesség
E_h	húrmodulus
σ_M	szilárdság
σ_B	szakadási szilárdság
σ_y	folyási feszültség, folyáshatár
ε_M	szilárdsági nyúlás
ε_B	szakadási nyúlás
W_B	törési munka
W_C	ütőmunka
h	magasság
b	próbatest szélessége
a_{cU}	bemetszés nélküli próbatesten mért fajlagos ütőmunka
a_{cN}	bemetszett próbatesten mért fajlagos ütőmunka

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm azon gépészmérnök és mechatronikai mérnök hallgatók erőfeszítéseit, akik időt és energiát nem sajnálva, odaadással dolgoztak a bemutatott eszközök, berendezések tervezésén és kivitelezésén. Segítségükkel a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Marosvásárhelyi Karán gyakorlatban szemléltethetjük a polimer anyagok tulajdonságaira és feldolgozására irányuló tantárgyak laborgyakorlatait. Így köszönöm Boros Albert, Lapohos Örs, Kelemen Barna, Gyárfás Attila, Kedves Botond, Borzás Hunor, Dénes László, Fábián Hunor, Főcze Attila, Balika Róbert Márton, Birton Botond, Gál Csongor, Izsák Norbert, Nagy-Serbán Albert, Székely László munkáját.

SZAKIRODALOM

1. Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: *A polimerteknika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
2. Wolfgang Grellmann, Sabine Seidler (Eds.): *Polymer Testing*. Hanser, Munich, 2007.
3. Bitay Enikő: *Anyagtudományi laboratórium I.: Tulajdonságminősítő vizsgálatok*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2011.
4. Dunai Antal, Macskási Levente: *Műanyagok fröccsentése*. Lexika, Budapest, 2003.
5. Alfred Rudin, Choi Phillip: *The Elements of Polymer Science and Engineering*. Academic Press, Oxford, 2012.
6. George Odian: *Principles of Polymerization*. John Wiley & Sons, New York, 2004.
7. Hans-Georg Elias: *Mega Molecules: Tales of Adhesives, Bread, Diamonds, Eggs, Fibers, Foams, Gelatin, Leather, Meat, Plastics, Resists, Rubber... and Cabbages and Kings*. Springer Science & Business Media, Berlin, 2013.
8. Zehev Tadmor, Gogos Costas G. : *Principles of Polymer Processing*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2006.
9. Michael M. Coleman, Paul C. Painter: *Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text*. Technomic Publishing, Basel, 1994.
10. Chris Rauwendaal: *Polymer Extrusion*. Carl Hanser Verlag, Munich 2014.
11. David O. Kazmer: *Injection Mold Design Engineering*. Carl Hanser Verlag, Munich, 2007.
12. Dominick V. Rosato, Marlene G. Rosato: *Injection Molding Handbook*. Springer Science & Business Media, Berlin, 2012.
13. Zheng Rong, Roger I. Tanner, Xi-Jun Fan: *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*. Springer Science & Business Media, Berlin, 2011.
14. Kamal R. Musa, Avram I. Isayev (Eds.): *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Carl Hanser Verlag, Munich, 2012.
15. Andrew Ciesielski: *An Introduction to Rubber Technology*. Rapra Technology Limited, Shawbury, 1999.
16. Arkadii Arinstein: *Electrospun Polymer Nanofibers*. Pan Stanford Publishing, Singapore, 2018.
17. Anthony L. Andrady: *Science and Technology of Polymer Nanofibers*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.

POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY LABORATORY

Summary

Our everyday life would be unimaginable without polymeric materials. The development in the field of polymer science and technology reached such a scale in the past 130 years, since the discovery of the first synthetic polymeric material, that these days they can be found in every industry and in countless applications. Even if we think only of the packaging materials, different parts of machines, the cases of electrical equipment, the OLED TV screens, medical instruments and biomedical applications, glasses, contact lenses, sealants, textile industry, hoses, rubber industry the average person gets in contact with polymeric materials several times a day. Contrary to this, there is only limited information regarding polymeric materials not only in school textbooks but in the university curriculum. Especially in the field of engineering the properties of polymeric materials should be presented in detail.

The Sapientia Hungarian University of Transylvania realized the importance of polymeric materials in the field of engineering and the lack of specialized personal in the Transylvanian region of Romania. Thus, there are two courses dealing with the properties and processing of polymers in the curriculum of the Mechanical Engineering major.

This book presents laboratory exercises, that supplement the study material and allows the practical understanding of fundamentals through experimentation. The laboratory exercises start with the fundamentals, followed by the presentation of the used instruments, that were designed and implemented by student with the guidance of the author. All lab equipments were the subject of a final project of mechanical or mechatronics engineering students. These accomplishments all follow budget friendly implementations that are suitable for educational purposes, which could inspire other student in the field of engineering.

The book is divided into two parts: the first part deals with the fundamental mechanical properties of polymeric materials, whereas the second part focuses on the major polymer processing technologies. The first laboratory exercise fo-

cuses on the viscous properties of polymer melts, that is followed by the investigation of tensile properties, hardness, toughness and finally the viscoelastic properties.

The second part discusses the major polymer processing technologies, that are presented by connecting them to the recycling process of thermoplastics. There are several advantages in using thermoplastics, however the development of personal knowledge and the legal background with regards to waste management of polymeric materials lags behind the development of new materials and processes. Consequently, polymeric waste has an enormous effect on the environment. The presented laboratory exercises follow the recycling sequence of thermoplastics after the selective waste collection. The first step is grinding, followed by extrusion to prepare a filament from the grinded plastic. The filament is then chopped into small pieces by a machine to produce granulates, that can be used to injection mold a new part from the recycled plastic. Vacuum forming is also presented that is one of the most utilized processes in the packaging industry. The last two laboratory exercises deal with the production of polymeric nanofibers by electrospinning and centrifugal spinning techniques.

CONTENTS

FOREWORD	7
I . POLYMER SCIENCE LABORATORY	9
1. Viscous properties	11
1.1. Fundamentals	11
1.2. Unique design melt flow indexer	16
1.3. Measurements.....	18
2. Tensile properties	19
2.1. Fundamentals.....	19
2.1.1. The specimen	23
2.1.2. Measurable mechanical characteristics.....	24
2.2. Unique design uniaxial tensile instrument.....	27
2.3. Measurements.....	29
3. Charpy toughness.....	30
3.1. Fundamentals.....	30
3.2. Unique design Charpy pendulum impact tester	34
3.3. Measurements.....	35
4. Hardness	36
4.1. Fundamentals.....	38
4.1.1. Shore hardness	40
4.2. Unique design Shore hardness durometer	40
4.3. Measurements.....	41
5. Time-dependent mechanical properties.....	42
5.1. Fundamentals.....	42
5.1.1. Creep.....	44
5.2.1. Stress relaxation	46
5.2. Measurements.....	46
II. POLATIC PROCESSING LABORATORY	47
6. Grinding.....	49
6.1. Fundamentals.....	50
6.2. Unique design plastic grinder	50
6.3. Measurements.....	52

7. Extrusion.....	53
7.1. Fundamentals.....	54
7.2. Unique design extruder.....	57
7.3. Measurements.....	58
8. Granulation	60
8.1. Fundamentals.....	60
8.2. Unique design granulate machine	62
8.2.1. Granulation with rotary knife	62
8.3. Measurements.....	63
9. Injection molding	64
9.1. Fundamentals.....	64
9.1.1. The injection cycle	64
9.1.2. The injection molding machine.....	66
9.2. Unique design injection molding machine	67
9.2.1. The tool.....	70
9.2.2. Cavity pressure measurement.....	72
9.3. Measurements.....	73
10. Vacuum forming.....	74
10.1. Fundamentals	74
10.2. Unique design vacuum forming machine	77
10.3. Measurements	77
11. Electrospinning	79
11.1. Fundamentals	79
11.2. Unique design capillary moving system.....	81
11.3. Unique design rotary collector	83
11.4. Measurements	84
12. Centrifugal spinning.....	85
12.1. Fundamentals	85
12.2. Unique design centrifugal spinning machine.....	86
12.3. Measurements	89
ABBREVIATIONS	90
ACKNOWLEDGEMENTS	92
BIBLIOGRAPHY.....	93
POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY LABORATORY.....	94
Contents	96
LABOR FÜR POLYMERWISSENSCHAFT UND -TECHNOLOGIE	98
Inhalt	100
LABORATORUL DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE A POLIMERILOR	102
Cuprins	104

LABOR FÜR POLYMERWISSENSCHAFT UND -TECHNOLOGIE

Zusammenfassung

Ohne Polymere - oder Kunststoffe - wäre der Alltag in seiner heutigen Form nicht denkbar. Mit dem Aufkommen des ersten vollsynthetischen Polymermaterials, der sogenannten Bakelit, hat sich das Fachgebiet in den letzten 130 Jahren so stark weiterentwickelt, daß Polymere heute in jeder Branche und in unzähligen Anwendungen zu finden sind. Wenn wir an Verpackungsmaterialien, Maschinen- und Gerätekompontenten, Abdeckungen für elektronische Geräte - sogar Bildschirme (OLEDs aus Polymeren), medizinische Geräte und Medikamententräger, Zahnfüllungen, Brillengläser, Dichtungsmaterialien, Textilien, Schläuche und Gummi denken, kommt der gewöhnlicher Mensch mehrmals täglich mit Polymermaterialien in Berührung. Trotzdem gibt es nur wenige Informationen über Polymere in den Lehrplänen der Schulen oder sogar in den Grundlagenfächern der Hochschulen. Die Einführung von Polymeren sollte eine Priorität in der Ingenieurausbildung sein.

Die Sapientia Ungarische Universität Transsilvanien hat die Bedeutung von Polymerwerkstoffen für technische Anwendungen und den Mangel an Fachleute in der transsilvanische Region Rumänien erkannt. So werden im Fachbereich Maschinenbau die Eigenschaften und die Verarbeitungstechnik von Polymerwerkstoffen in zwei Kursen behandelt. Nach der Darstellung der theoretischen Grundlagen des Faches in den Laborübungen erfolgt die Beschreibung von Geräten, die im Rahmen von Diplomarbeiten entworfen und gebaut wurden. So sind die Laborgeräte, mit denen bestimmte Materialeigenschaften oder die Grundprinzipien der Verarbeitungstechniken untersucht werden können, das Werk der Studenten von Maschinenbau oder Mechatronik Fachrichtungen. Diese Realisierungen, die zwar eine kosteneffiziente Konstruktion erforderten, sich aber hervorragend zur Veranschaulichung der Prinzipien eignen, können Studenten der unteren Studiumjahren inspirieren.

Das Buch gliedert sich in zwei Teilen: Der erste Teil umfasst die grundlegenden mechanischen Eigenschaften der Polymerwerkstoffen, während der zweite Teil enthält die wichtigsten Verarbeitungstechnologien für Polymere, insbesondere für Thermoplaste. Die erste Laborübung beschäftigt mit der Messung einer der

wichtigsten Parametern für die Verarbeitung thermoplastischer Polymere, der Fließindex. Demnach sind Erklärungen über die Zugprüfung von Polymerwerkstoffen, Zähigkeit, Härte und Viskoelastizität aufgereihten.

Der zweite Teil befasst sich mit Techniken der Polymerverarbeitung im Verbindung mit der Wiederverwendung der Polymermaterialien. Die Verwendung von Kunststoffen hat viele Vorteile, aber die rasante Entwicklung und Verwendung von Polymeren ist nicht mit der Entwicklung der Abfallwirtschaft und dem Wissen der Menschen über diese Materialien einhergegangen. Infolgedessen haben Polymere Werkstoffe drastische Auswirkungen auf unsere Umwelt. In diesem Zusammenhang führt das Buch den Leser in die technologischen Schritte der Wiederverwendung ein, deren erste Stufe die Zerkleinerung nach der selektiven Sammlung ist. Der geschredderte Kunststoff kann extrudiert werden, um Fasern zu erzeugen, die dann zu Granulat geschnitten werden. Granulat ist das am häufigsten verwendete Rohmaterial für die Kunststoffverarbeitung.

Im Folgenden werden das Spritzgießen und das, in der Verpackungsindustrie bevorrechtigte Vakuumtiefziehen beschrieben. Es gibt viele bekannte Anwendungen für Nanofasergewebe aus Polymeren. In den nächsten zwei Laborübungen werden elektrostatische und zentrifugale Faserbildungsprozesse beschrieben.

INHALT

VORWORT	7
I. LABORATORIUM FÜR POLYMERISCHE WERKSTOFFE	9
1. Fließindex.....	11
1.1. Theoretische Grundlagen.....	11
1.2. Eigenartiges Kapillar-Plastometer	16
1.3. Messungen	18
2. Bruchtest.....	19
2.1. Theoretische Grundlagen.....	19
2.1.1. Der Probekörper.....	23
2.1.2. Die mechanischen Eigenschaften, die bestimmt werden können.....	24
2.2. Eigenartiges einachsige Zugmaschine	27
2.3. Messungen	29
3. Der Charpy-Schlagversuch	30
3.1. Theoretische Grundlagen.....	30
3.2. Eigenartiges Charpy-Pendelschlagwerk	34
3.3. Messungen	35
4. Härtemessung.....	36
4.1. Theoretische Grundlagen	38
4.1.1. Messung der Shore-Härte	40
4.2. Eigenartiges Ausrüstung zur Messung der Shore-Härte	40
4.3. Messungen	41
5. Kriechen und Spannungsabbau	42
5.1. Theoretische Grundlagen	42
5.1.1. Kriechen	44
5.2.1. Spannungsabbau	46
5.2. Messungen	46
II. KUNSTSTOFFVERARBEITUNGLABORATORIUM.....	47
6. Trennung.....	49
6.1. Theoretische Grundlagen	50
6.2. Eigenartiges Zerkleinerungsmaschinen für Kunststoffe	50
6.3. Messungen	52

7. Extrusion (Strangpressen)	53
7.1. Theoretische Grundlagen	54
7.2. Eigenartiges Extruder	57
7.3. Messungen	58
8. Vorbereitung des Granulats	60
8.1. Theoretische Grundlagen	60
8.2. Eigenartiges Granulataufbereitungsanlage	62
8.2.1. Vorbereitung des Granulats mit einem Drehmesser	62
8.3. Messungen	63
9. Spritzgießen	64
9.1. Theoretische Grundlagen	64
9.1.1. Der Spritzgießzyklus	64
9.1.2. Die Spritzgießmaschine	66
9.2. Eigenartiges pneumatische Spritzgießmaschine	67
9.2.1. Das Spritzgießwerkzeug	70
9.2.2. Messung des Werkzeuginnendruckes	72
9.3. Messungen	73
10. das Tiefziehen	74
10.1. Theoretische Grundlagen	74
10.2. Eigenartiges Vakuumformgeräte	77
10.3. Messungen	77
11. Elektrostatische Faserbildung	79
11.1. Theoretische Grundlagen	79
11.2. Sonderanfertigungen von Umzugsgut	81
11.3. Eigenartig aufgebaute Fasersammler mit Drehtrommel	83
11.4. Messungen	84
12. Zentrifugale Faserbildung	85
12.1. Theoretische Grundlagen	85
12.2. Eigenartiges Zentrifugal-Faserbildungsanlage	86
12.3. Messungen	89
BEZEICHNUNGEN	90
DANKSAGUNG	92
LITERATUR	93
POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY LABORATORY	94
Contents	96
LABOR FÜR POLYMERWISSENSCHAFT UND -TECHNOLOGIE	98
Inhalt	100
LABORATORUL DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE A POLIMERILOR	102
Cuprins	104

LABORATOR DE ȘTIINȚA ȘI TEHNOLOGIA POLIMERILOR

Rezumat

Fără materiale polimerice, viața de zi cu zi în forma ei actuală ar fi de neimaginat. Odată cu apariția primului material polimeric complet sintetic, vinilul, în ultimii 130 de ani s-a produs o dezvoltare de asemenea amploare în această disciplină, încât în zilele noastre, materialele polimerice pot fi găsite în toate ramurile industriale și în cele mai diverse utilizări. Dacă ne gândim doar la materialele de ambalaj, la componentele mașinilor și echipamentelor, carcasele dispozitivelor electronice și chiar ecranul monitoarelor și televizoarelor (polimer OLED), la dispozitivele medicale și biomaterialele din industria de medicamente, la plombele dentare, la lentilele pentru ochelari, continuând cu elemente de etanșare, industria textilă, țevi, industria cauciucului, putem admite că o persoană obișnuită intră în contact cu materiale polimerice de mai multe ori pe zi. În ciuda acestui fapt, doar informații limitate despre polimeri pot fi găsite în programa școlară și chiar în cadrul disciplinelor de bază din învățământul superior. În cazul în care avem în vedere educația inginerească, un rol special ar trebui acordat prezentării materialelor polimerice.

Universitatea Sapiientia din Cluj-Napoca a recunoscut importanța materialelor polimerice în aplicațiile de inginerie, cât și lipsa specialiștilor în prelucrarea materialelor polimerice în regiunea Transilvaniei. Astfel, proprietățile și tehnologia de prelucrare ale materialelor polimerice sunt discutate în cadrul a două discipline la specializările de Tehnologia Construcțiilor de Mașini și Mecatronică Inginerie mecanică. În această carte sunt prezentate lucrări de laborator care fac posibilă asimilarea cunoștințelor de bază prin practică. În cadrul lucrărilor de laborator, după prezentarea fundamentelor teoretice aferente temei, urmează descrierea echipamentelor, proiectate și realizate în cadrul lucrărilor de diplomă. Astfel, echipamentele de laborator care permit studiul proprietăților polimerilor sau principiile de bază ale tehnologiei de prelucrare sunt lucrările studenților de la specializările în Tehnologia Construcțiilor de Mașini sau Mecatronică. Aceste echipamente, cu toate că au fost proiectate și realizate în regim de buget limitat, sunt pe deplin utilizabile pentru prezentarea principiilor de bază și pot trezi interesul studenților din primii ani de la inginerie.

Cartea este structurată pe două secțiuni: prima parte tratează proprietățile mecanice de bază ale materialelor polimerice, în timp ce a doua parte prezintă cele mai importante tehnologii de prelucrare a polimerilor, în special a materialelor termoplastice. În prima parte, este prezentat unul dintre cei mai semnificativi parametri necesari pentru prelucrarea polimerilor termoplastici, și anume indicele de curgere. Acesta este urmat de prezentarea procedeele de măsurare specifice: testul de tracțiune, de duritate și măsurarea proprietăților viscoelastice ale materialelor polimerice.

În cea de-a doua parte se prezintă tehnologiile de prelucrare a polimerilor, care sunt strâns legate de reciclarea materialelor polimerice. Utilizarea materialelor polimerice are multe avantaje, dar dezvoltarea și utilizarea rapidă a polimerilor nu a progresat în același ritm cu gestionarea deșeurilor și responsabilitatea utilizatorilor. Datorită acestui fapt, efectul poluant al materialelor polimerice are o influență drastică asupra mediului. În acest sens, cartea introduce cititorii în etapele tehnologice ale reciclării, al cărui prim pas este măcinarea după colectarea selectivă a deșeurilor. Fibrele pot fi produse din materialul plastic măcinat folosind un extruder, iar acestea ulterior pot fi tăiate în granule. Granulele sunt cea mai comună formă de materie primă pentru procesele de prelucrare ale materialelor plastice. În cele ce urmează, sunt descrise injectarea și termoformarea în vid, care sunt utilizate în mod frecvent în procesele de ambalare a produselor. Sunt cunoscute multe aplicații posibile ale benzilor nanofibroase produse din materiale polimerice. Următoarele două lucrări de laborator prezintă procedeele de formare a fibrelor electrostatice și centrifuge, care sunt potrivite pentru producerea de fibre folosind forțele electrostatice sau centrifuge.

CUPRINS

PREFAȚĂ	7
I. LUCRĂRI DE LABORATOR DE ȘTIINȚA POLIMERILOR	9
1. Vâscozitatea	11
1.1. Fundamentele teoretice	11
1.2. Plastometru de concepție proprie	16
1.3. Măsurări.....	18
2. Încercarea la tracțiune	19
2.1. Fundamentele teoretice	19
2.1.1. Proba de tracțiune	23
2.1.2. Caracteristici mecanice determinabile	24
2.2. Mașină de încercare la tracțiune de concepție proprie	27
2.3. Măsurări.....	29
3. Testul de reziliență Charpy	30
3.1. Fundamentele teoretice	30
3.2. Ciocan pendul Charpy de concepție proprie	34
3.3. Măsurări.....	35
4. Duritatea	36
4.1. Fundamentele teoretice	38
4.1.1. Duritatea Shore	40
4.2. Durometru Shore de concepție proprie	40
4.3. Măsurări.....	41
5. Fluajul și relaxare	42
5.1. Fundamentele teoretice	42
5.1.1. Fluajul.....	44
5.2.1. Relaxare	46
5.2. Măsurări.....	46
II. LUCRĂRI DE LABORATOR DE PRELUCRAREA POLIMERILOR.....	47
6. Tocarea.....	49
6.1. Fundamentele teoretice	50
6.2. Mașina de tocat de concepție proprie	50
6.3. Măsurări.....	52

7. Extrudare.....	53
7.1. Fundamentele teoretice	54
7.2. Extruder de concepție proprie	57
7.3. Măsurări.....	58
8. Granularea.....	60
8.1. Fundamentele teoretice	60
8.2. Granulator plastic de concepție proprie	62
8.2.1. Granulator cu cuțit rotativ.....	62
8.3. Măsurări.....	63
9. Procesul de formare prin injecție.....	64
9.1. Fundamentele teoretice	64
9.1.1. Ciclul de injecție	64
9.1.2. Mașina de injectat	66
9.2. Mașina de injecție de concepție proprie	67
9.2.1. Matrița.....	70
9.2.2. Presiune in matrița.....	72
9.3. Măsurări.....	73
10. Formarea prin vacuum.....	74
10.1. Fundamentele teoretice	74
10.2. Mașina de formare prin vacuum de concepție proprie	77
10.3. Măsurări.....	77
11. Procedul de electrospinning.....	79
11.1. Fundamentele teoretice	79
11.2. Sistem de mișcare	81
11.3. Colectorul rotativ	83
11.4. Măsurări.....	84
12. Spinningul centrifugal	85
12.1. Fundamentele teoretice	85
12.2. Mașina de centrifugal spinning.....	86
12.3. Măsurări.....	89
NOTAȚII	90
MULȚUMIRI	92
BIBLIOGRAFIE.....	93
POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY LABORATORY	94
Contents	96
LABOR FÜR POLYMERWISSENSCHAFT UND -TECHNOLOGIE.....	98
Inhalt	100
LABORATORUL DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE A POLIMERILOR.....	102
Cuprins	104

A SOROZAT EDDIG MEGJELENT KÖTETEI:

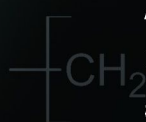
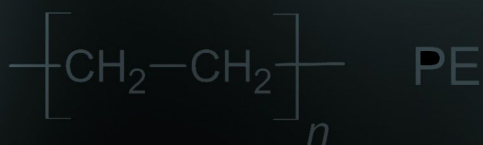
1. Jodál Endre: *Számítástechnika az ezredforduló küszöbén*. 1992.
2. Pálfalvi Attila: *Porkohászat*. 1993.
3. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Bevezetés az anyagtechnológiák informatikájába*. 2007.
4. Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. 2007.
5. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Felületkezelés*. 2009.
6. Forgó Zoltán: *Bevezetés a mechatronikába*. 2009.
7. Tolvaly-Rosca Ferenc: *A számítógépes tervezés alapjai. AutoLisp és Autodesk Inventor alapismeretek*. 2009.
8. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Hegesztéstechnika I. Eljárások és gépesítés*. 2010.
9. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Hegesztéstechnika II. Berendezések és mérések*. 2010.
10. Máté Márton: *Műszaki mechanika – kinematika*. 2010.
11. Bitay Enikő: *Anyagtudományi laboratórium I. Tulajdonságminősítő vizsgálatok*. 2011.
12. Máté Márton: *Hengeres fogaskerek gyártószerszámai*. 2016.
13. Tolvaly-Rosca Ferenc: *Gépelemek*. 2019.
14. Papp István: *Mechanizmusok optimális kiegyensúlyozásának elmélete*. 2020.
15. Harangus Katalin – Kakucs András: *Valószínűségszámítás és statisztika a mérnöki gyakorlatban*. 2021.
16. Bitay Enikő: *Hegesztési alapismeretek*. 2021.
17. Bitay Enikő, Végvári Ferenc: *Hőkezelési laboratórium*. 2022.

ELŐKÉSZÜLETBEN:

Máté Márton: *Forgácsolószerszámok tervezése*.

Forgó Zoltán: *Ipari robotok kinematikája és dinamikája*.

Bitay Enikő: *Anyagtudományi laboratórium II. Anyagszerkezettani vizsgálatok*.



A polimer anyagok családjába tartozó műanyagok és gumifélék napjaink leginkább használt anyagtípusai közé tartoznak. A hétköznapi élet során naponta számos alkalommal találkozunk a műanyagokkal; elegendő csak a csomagolóanyag-iparra, a textiliparra vagy az autóiparra gondolni. Ezzel szemben a polimer anyagok tulajdonságairól keveset tudunk, és ez a tudás leginkább a környezetszennyezésről meglévő ismeretekben nyilvánul meg. Ez a könyv a polimer anyagok alapvető mechanikai tulajdonságait és a műanyagok esetén a legelterjedtebb feldolgozási eljárásokat mutatja be az olvasónak. A bemutatott ismeretek elsősorban a mérnöki orientáltságú olvasót célozzák meg, aki megfelelő elméleti alapismeretekkel és gyakorlati megvalósításokkal bővítheti a tudását. Ugyanakkor a könyv a műanyagok újrahasznosítását is tárgyalja, ami a szerző szándéka szerint hozzájárul a környezettudatos neveléshez.



PTFE

ISBN 978-606-739-229-6



9 786067 392296