



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

NAGY SZÁLTARTALMÚ ÖNERŐSÍTÉSES POLIPROPILÉN ÉS POLIÉSZTER
KOMPOZITOK FEJLESZTÉSE

TDK DOLGOZAT

LÁSZLÓ ZSÓFIA
LUKETICS MILÁN

KONZULENS:

DR. BÁRÁNY TAMÁS
EGYETEMI DOCENS

KMETTY ÁKOS
EGYETEMI TANÁRSEGÉD

Tartalomjegyzék

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK	3
A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK.....	3
1. BEVEZETÉS.....	5
2. ÖNERŐSÍTÉSES KOMPOZITOK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁI.....	8
2.1. KOMPAKTÁLÁSOS ELJÁRÁS	9
2.2. KOEXTRUDÁLT SZALAGOK KONSZOLIDÁLÁSOS ELJÁRÁSA.....	12
2.3. RÉTEGELÉSES ELJÁRÁS	14
2.4. SZELEKTÍV HEVÍTÉS	18
2.5. FRÖCCSÖNTÉSEL FELDOLGOZHATÓ, ÖNERŐSÍTÉSES KOMPOZIT ELŐGYÁRTMÁNY	18
3. GYÁRTÁSTECHNOLÓGIAI LÉPÉSEK.....	20
3.1. TEKERCSELÉS.....	20
3.2. PRÉSELÉS	22
3.3. FRÖCCSÖNTÉS.....	23
3.3.1. Granulátum előállítása.....	23
3.3.2. Fröccsöntés.....	24
4. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	26
4.1. POLIPROPILÉN KOMPOZIT ALAPANYAGAI.....	26
4.2. POLIÉSZTER KOMPOZIT ALAPANYAGAI	28
4.3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	30
4.3.1. Optikai mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp	30
4.3.2. Szakítóvizsgálat	31
4.3.3. Ejtődárdás vizsgálat	34
4.3.4. Zsugorodás vizsgálat	35
5. ÖNERŐSÍTETT POLIMER KOMPOZIT LAPOK TULAJDONSÁGAI.....	36
5.1. OPTIKAI MIKROSKÓP ÉS PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP	36
5.2. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT	39
5.3. EJTÖDÁRDÁS VIZSGÁLAT	44
FRÖCCSÖNTÖTT PRÓBATESTEK VIZSGÁLATA.....	46
5.4. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT	46
5.5. ZSUGORODÁS VIZSGÁLAT	48
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	49
7. TOVÁBBI MEGOLDÁSRA VÁRÓ FELADATOK	51
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	52
9. MELLÉKLET	54

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

A_0	[mm ²]	kezdeti keresztmetszet
B	[mm]	próbatest vastagsága
E_h	[MPa]	rugalmassági modulus
$E_{\max}$	[J]	törés teljes energiája
E_p	[J/mm]	perforációs energia
ΔH	[mW]	hőáram
L	[mm]	a befogópofák közötti eredeti távolság
ΔL	[mm]	a befogópofák közötti távolság növekedése
$m_{\text{fólia}}$	[g]	egy fóliaréteg tömege
m_{al}	[g]	alumínium maglemez tömege
$m\%$	[%]	tömegszázalék
T	[°C]	hőmérséklet
T_{kr}	[°C]	kristályosodási hőmérséklet
T_g	[°C]	üvegesedési hőmérséklet
T_m	[°C]	olvadási csúcshőmérséklet
σ_M	[MPa]	húzófeszültség
ε_1	[%]	0,05%-os relatív nyúlás
ε_2	[%]	0,25%-os relatív nyúlás
σ_1	[MPa]	0,05%-os relatív nyúláshoz tartozó feszültség
σ_2	[MPa]	0,25%-os relatív nyúláshoz tartozó feszültség

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK

DSC	differentiál pásztázó kalorimetria
HDPE	nagy sűrűségű polietilén
PE	polietilén
PP	polipropilén
UD	egyirányú (unidirekcionális) erősítőszerkezet
CP	keresztirányú (cross-ply, 0/90°) erősítőszerkezet
α -PP	α -módosulatú polipropilén
β -PP	β -módosulatú polipropilén
rPP	random polipropilén kopolimer

iPP	izotaktikus polipropilén
SCORIM	nyírást megvalósító fröccsöntései technológia
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp
VEM	végeselemes modell

1. Bevezetés

Az elmúlt évtized során a műanyagok térnyerése megállíthatatlanul folytatódott. Elég, ha az ember végigsétál a lakásában, megszámlálhatatlan mennyiségű termék lepi el a polcokat, szekrényeket melyek mind polimer felhasználásával készültek. A technológiák fejlődése lehetőséget adott arra is, hogy az évtizedekkel korábban csak az űr- és haditechnikában alkalmazott kiváló minőségű polimerből készült termékek otthonaink részét képezzék. Ma már senki nem lepődik meg egy szénszál erősítésű laptop borításon, mint ahogy az utazások előtt előkerülő pillekönnyű, de strapabíró bőrönd sem kelt feltűnést.

Az emberiség jelentős része a fentieket érzékeli a műanyagok műszaki fejlődéséből. Ezen nagyszerű fejlesztések talán idővel a gyengébb minőségű, tömegműanyagok által a köztudatba égetett pejoratív mögöttes jelentést is felülírják, amelyek a műanyag szó hallatán ébrednek sokakban. A mesterséges, illetve a természetes alapú mesterséges polimerek lehetőséget nyújtanak a kisebb sűrűségükből adódó jelentős tömegcsökkentésre olyan termékek esetében, ahol korábban csak fémeket vagy kerámiákat tudtak alkalmazni. További kedvező tulajdonságként említhető a korrózióval szembeni ellenállóság, a jó csillapító képesség (elektromos, mágneses, hő) és a tervezői szabadság nagyfokú biztosítása (összetett geometria, hatalmas méretek).

A polimerek egyre nagyobb méreteket öltő felhasználása ugyanakkor előtérbe hozza az újrahasznosítás problémáját. Napjainkban a legtöbb kritika és vád ezért éri a mesterséges polimerek előállítását, feldolgozását valamint felhasználását. Magyarországot tekintve az éves szinten keletkező hulladék 12%-a műanyag. A hőre lágyuló műanyagok újrahasznosításának jellemzően a lakosság passzív hozzáállása, illetve hiányos ismereteik szabnak gátat, elég a méltánytalanul kevesek által ismert hulladékudvarokra gondolni. Az iparban viszont szigorú előírásokkal igyekeznek biztosítani a minél nagyobb mértékű újrahasznosítást. Példaként felhozható az Európai Unió által 2000-ben megfogalmazott direktíva (2000/53/EC EU- End-of-Life Vehicle (ELV)), amely szerint 2015-re a járműipari alkatrészek 95%-át újra kell hasznosítani [1]. Ebből az értékből 85% az ismételt használatra vagy mechanikus újrahasznosításra, míg 10% energiaipari felhasználásra (pl. hulladékegető) vonatkozik. Ha figyelembe vesszük, hogy egy korszerű személygépkocsi ~70 térfogat%-át teszik ki a szintetikus polimerek, a feladat nagysága könnyen belátható.

A polimerek mechanikai tulajdonságainak növelése érdekében alkalmaznak sok esetben kompozitokat. A kompozitok olyan többfázisú, összetett szerkezeti anyagok, amelyekben a nagyszilárdságú erősítőanyag és a szívós mátrix között erős adhéziós kapcsolat van [2]. Erősítőanyagként általában szén-, illetve üvegszálakat alkalmaznak. Előnyük a nagy szilárdság, kis tömeg és könnyű feldolgozhatóság. Nagy hátrányuk azonban, hogy csak nehezen és költségesen hasznosíthatók újra, mivel vagy jelentős mechanikai tulajdonságromlás árán használhatóak fel újra, vagy gondoskodni kell a mátrix és az erősítőanyag különválasztásáról, ami pluszköltségként jelenik meg.

Az újrahasznosítás megoldását a kompozitok esetében a természetes szál- és rosterősítésű rendszerekben látták. A természetes szál alatt olyan anyagokat értünk, amely szál formában fellelhető a természetben. A növényi (pamut, len, kender stb.), állati és ásványai eredetű erősítőanyagok feldolgozhatók extrudálással és fröccsöntéssel is. Ezek a szálak termikus úton salakmentesen megsemmisíthetők, vagy mikroorganizmusok segítségével lebonthatók feltéve, hogy a mátrix biológiailag lebomló anyag. Hátrányuk, hogy míg ezen erősítőanyagok merevítenek, a rugalmassági moduluszt növelik, más mechanikai tulajdonságaik elmaradnak az üveg- és szénszálak kompozitokéhoz képest [3].

Másik út az újrahasznosítás problémájának megoldására az önerősítéses kompozitok előállítására. Ezek lényege, hogy a nagy szilárdságú erősítőanyag és a szívós mátrix is egyazon anyagcsaládba tartozik. A hulladéknak tekintett termék tehát egyszerűen ömledék állapotba hozható és újra feldolgozható. A mátrix- és erősítőanyag „rokonsága” lehetővé teszi, hogy a két fázis között felületkezelő anyag alkalmazása nélkül is kiváló adhéziós kapcsolat jöjjön létre. Előnyként jelenik meg még a tömegcsökkenés, mivel a hőre lágyuló szálak sűrűsége alacsonyabb a szervesetlen szálakénál. Az önerősítéses kompozitok előállítására három főtechnológia terjedt el: a komptaktálás, a koextrudált szalagok konszolidálása és a rétegeléses eljárás. Önerősített anyagok előállíthatók molekuláris szinten is, erősítőanyag hozzáadása nélkül, a termék/alkatrész gyártása során (pl. önerősítéses extrúzió, vibrációs fröccsöntés), illetve azt követően (pl. orientált kristályosítás, biaxiális fóliagyártás). Kezdetben az önerősített rendszert a láncmolekulák orientálásával valósították meg. Ilyen technológiák a konvergens profilú szerszámmal való extrudálás, a SCORIM technológia (nyírást megvalósító fröccsöntés), és a többlépcsős nyújtási eljárások [4].

A komptaktálásos technológia lényege, hogy a terhelés alatt levő szál felülete és magja másképp viselkedik. A hőmérséklet növelésével először a szál felülete, majd fokozatosan a szál közepe felé haladva a keresztmetszet egyre nagyobb hányada olvad

meg. Az ömledék állapotba került rész alkotja a mátrixot, az orientált állapotban maradt magrészt pedig az erősítőanyagot adja. A technológia optimalizálása során fontos megtalálni azt a feldolgozási hőmérsékletet, amelynél a szál felületének csak az összefüggő mátrix létrehozásához szükséges mennyiségű része olvad meg. Kompaktálással kiváló minőségű kompozitot tudnak előállítani, mivel a mátrix teljesen homogén. Hátránya viszont, hogy a csupán 3-5°C-os feldolgozási tartomány precíz technológiai háttérrel igényel.

A koextrudált szalagok konszolidációs eljárásának lényege, hogy a mátrix anyagát ráextrudálják az erősítőanyag magra, majd az így kapott rendszert nagymértékű nyújtásnak teszik ki, ezáltal kapja meg a szál az orientációt. A szál köpenyén levő külső anyag kisebb olvadáspontja biztosítja a szálak préselése közben az összefüggő mátrix kialakulását. A koextrúziós eljárás előnye a kompaktálással szemben, hogy a feldolgozási tartomány 20-30°C. Hátrányát viszont a plusz technológiai lépés jelenti.

A rétegeléses eljárás során az erősítőanyagot és a mátrix lapokat egymásra rétegezik, majd préseléssel egyesítik a rétegeket. A megfelelő hőmérséklet és a terhelésként alkalmazott nyomás hatására jön létre a konszolidáció a megolvadt mátrix és az erősítőanyag között. Előnye a változatos anyagkombinációk és erősítőstruktúrák alkalmazhatósága.

Az említett technológiák alapvetően alkalmasak önerősítéses kompozit lapok előállítására, amelyekből melegalakítással az üvegszálaz rendszert alkalmazó alkatrészeket kiváltó termékeket lehet előállítani. Elterjedésüket valószínűleg elsősorban nagy előállítási költségük, és korlátozott további feldolgozhatóságuk gátolja. Az egyik legtermelékenyebb polimer feldolgozási eljárás a fröccsöntés. Ezeknek a környezetbarát kompozitoknak a széleskörű elterjedését a fröccsöntéshez való optimalizálásuk segítené elő leginkább.

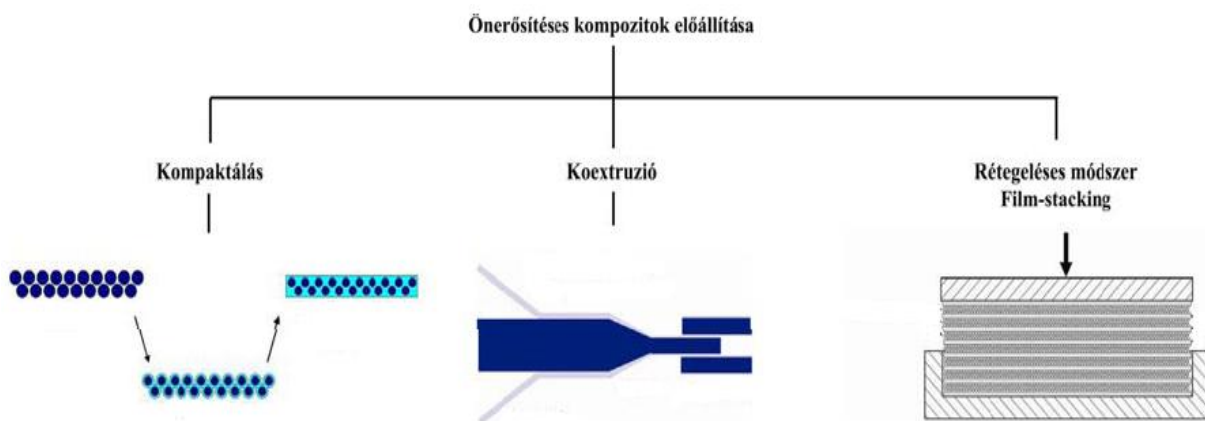
A fentieket látva a dolgozat célja tekercseléses és préseléses eljárás alkalmazásával nagy száltartalmú (~80 tömeg%) polipropilén illetve poliészter kompozit lapok előállítása. A gyártott kompozit lapok konszolidációjának, mechanikai és morfológiai tulajdonságainak továbbá az erősítőszálak elrendezésének – azaz egyirányban (UD) és keresztirányban (CP) erősített – minősítése statikus, dinamikus és mikroszkópi vizsgálatokkal. Az eredmények összehasonlítása a kereskedelemben kapható önerősítéses kompozit lemezek jellemzőivel.

Emellett az egyirányban erősített polipropilén kompozit lemezekből granulálással fröccsöntésre alkalmas alapanyag előállítása és a fröccsöntött termék mechanikai és morfológiai szempontból való minősítése.

2. Önerősítéses kompozitok gyártástechnológiái

Az 1960-as években néhány kutatócsoportban felmerült, hogy lehetséges lenne kiemelkedő mechanikai tulajdonságú polimereket előállítani magas fokú molekuláris orientáció alkalmazásával. A jó merevségű és szilárdságú, irányított molekula elrendezésű polimerek megjelenése új fejlesztési lehetőségeket kínált a kompozitok világában. Az orientáltság legegyszerűbben az extrudálást követő nyújtással vagy szálhúzással érhető el. Az ily módon előállított szálak képesek ellátni az erősítőanyag szerepét. A teljes egészében polimerből álló kompozitok előállítása utat nyitott az önerősítéses kompozitok megjelenéséhez. Ez utóbbi kifejlesztésére gazdasági és környezetvédelmi adtak okot. A mind mátrixában, mind erősítő anyagában egyazon anyagsaládba tartozó hőre lágyuló polimer kompozitok egyszerűen újrahasznosíthatóak ellentétben üveg- vagy szénszálal elődjeikkel.

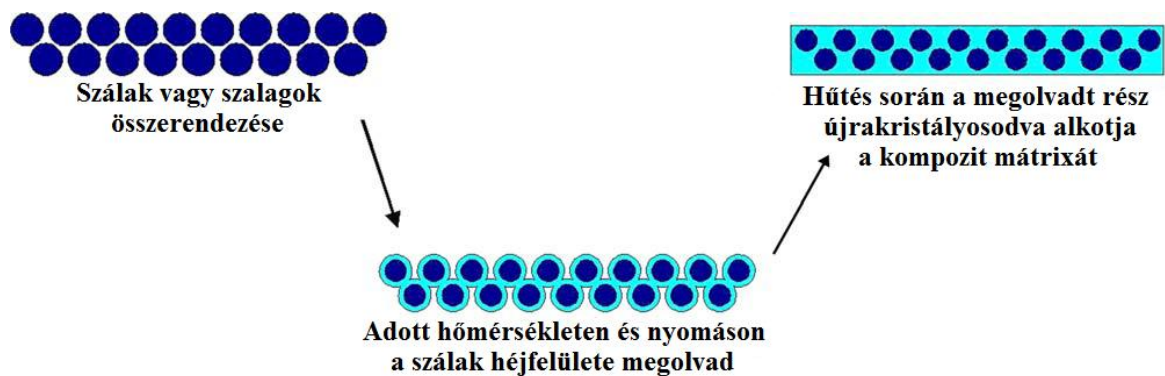
Az önerősítéses kompozitok előállítási technológiái közül három módszer terjedt el: kompaktálás (hot compaction), koextrudált szalagok konszolidálása (co-extrusion) és rétegelés (film-stacking) (1. ábra). A következőkben e három módszerrel elért eredményeket mutatjuk be röviden. Ezen kívül említést teszünk a legújabb, kísérleti technológiáról, a szelektív hevítéses (selective heating) eljárásról.



1. ábra: Különböző önerősített kompozit gyártási technológiák [5]

2.1. Kompaktálós eljárás

A kompaktálós eljárás azon alapul, hogy viszonylag kis nyomás és meghatározott hőmérséklet alatt a szálakon egy vékony külső réteg megolvad, majd rövid ideig tartó magasabb nyomás alatt hűtés közben újrakristályosodik a polimer, így kialakítva a mátrix anyagát. A meg nem olvadt rész alkotja az erősítő fázist. A technológia elvi vázlatát a 2. ábra mutatja. Bár a nyomás is fontos, a kompaktált struktúra tulajdonságai szempontjából a kompaktálás során alkalmazott hőmérséklet meghatározó. Az eljárás az orientált polimerek széles skálájánál alkalmazható, beleértve részben kristályos hőre lágyuló, folyadékkristályos és amorf szerkezetű szálakat is.



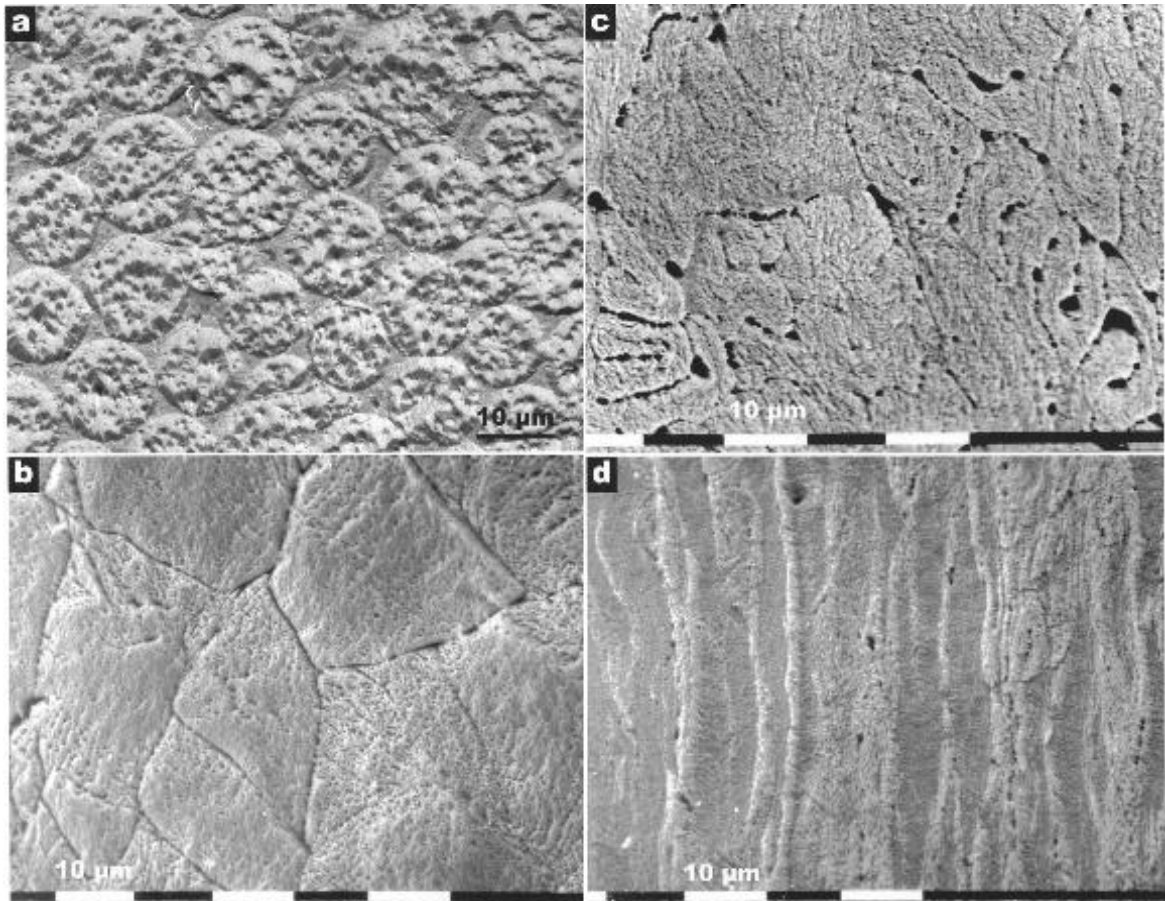
2. ábra: A kompaktálás elvi vázlata [4]

Ward és társai számos kutatást végeztek nagy orientáltságú polietilén extrudálásának, valamint különböző polimerek szálhúzásának témakörében. A kompaktálás eljárásának fejlesztésére is nagy figyelmet fordítottak. A technológia segítségével azonos alapanyagú, merev, erős és melegalakítható kompozit lemezeket állítottak elő. Az eljárásra alkalmas minden olyan polimer, amelyből lehetséges szálát húzni [6].

A kutatások során használt polietilénről később gazdasági okokból áttértek a polipropilén szálakra és szalagokra, amik szintén alkalmasnak bizonyultak a kompaktálós eljáráshoz. Megállapították, hogy a szálzsugorodás miatt nagyobb nyomásra van szükség, mint a HDPE esetében. Differenciál pásztázó kalorimetriás mérések (DSC) azt mutatták, hogy az alkalmazott kompaktálási hőmérsékletnek az eredeti PP szálaknál lágyító hatása van. Ez a jelenség a molekuláris orientáció relaxációjának eredménye, ezáltal merevség- és szilárdságcsökkenés tapasztalható. A kezdeti kísérletek tehát nem hoztak sikert. A kétrészes fém szerszámba egyirányú (unidirekcionális)

elrendezésben fektetett nagyszilárdságú polipropilén nem bizonyult alkalmasnak, a kompaktálás során a szálak túlzottan meglágyultak, az anyag kifolyt a szerszámból [7].

A későbbi tanulmányok során szőtt, fibrilláris PP-t alkalmaztak, ami beváltotta a hozzá fűzött reményeket, így jó kiinduló pontja lett a további kutatásoknak és fejlesztéseknek. A szőtt fibrilláris szalagokat zárt szerszámban akár 190°C-ig is fel lehet melegíteni ellentétben az egyirányú elrendezésével, ami már 174°C-on túlságosan kilágyul. A mechanikai és morfológiai vizsgálatok azt mutatták, hogy a jó szalag-szalag kapcsolódáshoz, jó rétegapcsolódáshoz az optimális hőmérséklet 182°C körül van. Ezen a feldolgozási hőmérsékleten megmarad az eredeti szerkezet megfelelő aránya, és ezáltal létrejön a kívánt erősítő hatás. A vizsgálatokhoz 200 µm széles és 25 µm vastag, ~906 kg/m³ sűrűségű, szőtt fibrilláris PP szalagokat alkalmaztak. A minták előkészítése során átlagosan nyolc réteget helyeztek a szerszámba. A PP szalag zsugorodása miatt a melegítést 2,8 MPa nyomáson végezték, majd 10 perc hűtőtartás után rövid ideig 7 MPa nyomást alkalmaztak [7, 8]. Az ideális hőmérsékleten kívül vizsgálták még a különböző (például kis/nagy molekula tömegű, kör/téglalap keresztmetszetű, nagy/kis orientáltságú) szövetfajták viselkedését a kompaktálás során. Eltérően más szálakétól az orientált PP erősítés szakadási nyúlása nagyobb, mint a megolvadt és újrakristályosodott mátrix fázisé. A mátrix nyúlását a lehető legnagyobbra kell választani, hogy elérje a szál szakadási pontját az integritás megtartásával. A mechanikai tulajdonságokon kívül a geometriai kialakítás is hatással van a termék minőségére. A 3. ábra különböző struktúrájú, kompaktált mintáról készült mikroszkópi felvételt mutat. A mátrix és az eredeti fázis közti megfelelő kapcsolat létrejöttéhez nagy felületekre van szükség. Ezt a követelményt a szalagból szőtt szövet jobban kielégíti, mint a szál, ráadásul az alapanyag ebben a formában könnyebben is kezelhető [9].



3. ábra: Különböző geometriájú alapanyagból készült kompaktált struktúrák: (a) Certran szál; (b) Spectra szál; (c) Dynema szál; (d) Tensylon szalag [10]

A kompaktált lemezek fontos tulajdonságai közé tartozik a szakítószilárdság és a rétegek közötti adhézió. A szerkezet minőségére a mátrix megolvadása és újrakristályosodása, és az így kialakult szerkezet van leginkább hatással. A megfelelő struktúra kialakításának meghatározásához különböző hűtési sebességeket alkalmaztak. Gyorsabb hűtés hatására kisebb kristályosság alakul ki, ennek köszönhetően több molekula vesz részt a kötésben, vagyis nagyobb lesz a lemez szilárdsága. A későbbi mechanikai tulajdonságokra a gyors hűtésen kívül a molekula tömeg is nagy hatással van [7].

A fejlesztések kiterjednek az autóalkatrészekeken kívül a sporteszközök, hangszóró tölcser, burkolatok és védősisakok területére is. 2001 óta a The British Technology Group engedélyével az AMOCO FABRICS GmbH a németországi Gronauban, nagyüzemi termelési létesítményeiben CURV[®] márkanévvel hoz forgalomba kompaktálással készült termékeket [7, 11]. A 4. ábrán kompaktálással készült PP kompozit autóalkatrész látható.

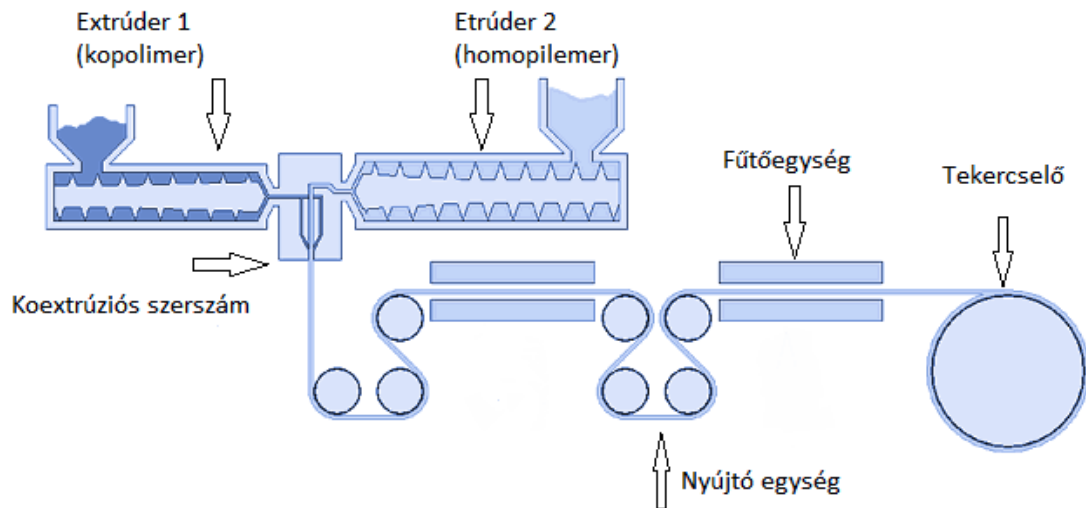


4. ábra: Önerősített PP kompozit autóipari alkalmazása [12]

Összességében a kompaktálásos önerősített kompozitok gyártásának egy nagy nehézsége akad. A kívánt szál/mátrix arány elérése szűk hőmérséklet tartományra (2-5°C) korlátozza az eljárást, vagyis precíz berendezéseket és kifinomult szabályozást, technológiát kíván.

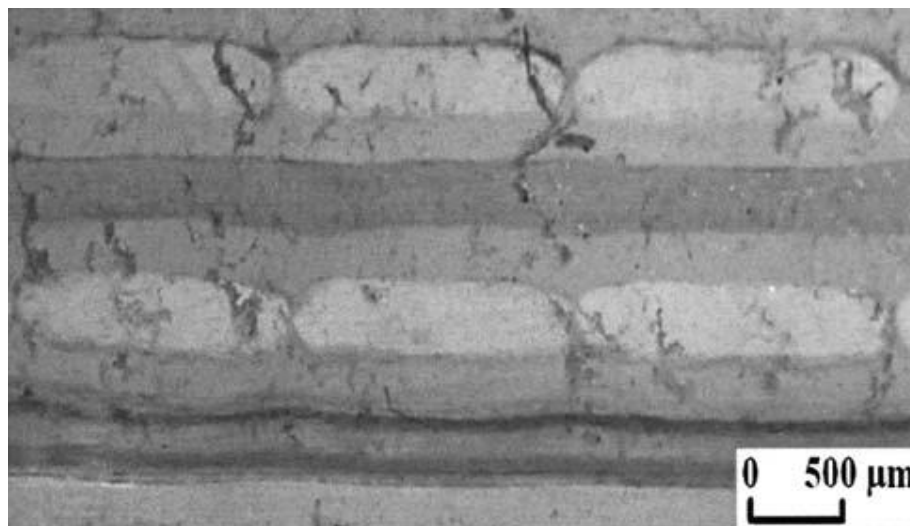
2.2. Koextrudált szalagok konszolidálásos eljárása

A koextrúzió alkalmas olyan termékek előállítására, amelyekben több, egyazon anyagcsaládba tartozó polimer van jelen és az anyagok tulajdonságaikban jól kiegészítik egymást úgy, hogy az anyagáramok nem keverednek [2]. Önerősítéses kompozitok esetében nagyobb olvadáspontú polipropilén homopolimerre (később ez alkotja az erősítést) ráextrudálunk egy kisebb olvadáspontú random polipropilén kopolimert, ami mátrixként szolgál majd. Az így előállított gyártmányból nyújtással készítik a kompozit kiinduló anyagául szolgáló szalagokat. A különböző húzási technikák a mechanikai tulajdonságok javítása miatt fontosak. A megfelelő morfológiai tulajdonságok eléréséhez kétlépcsős nyújtást alkalmaznak: az extruderből kilépő anyag előbb vízfürdőn halad át, majd belép a nyújtó egységbe, ahol először egy kisebb, majd egy nagyobb hőmérsékleten történik a húzás. A nyújtás során a szálakat kontaktmódon hengerekkel és/vagy forró levegő segítségével fűtik. A koextrudált szalagok konszolidálásos eljárásának vázlatát az 5. ábra szemlélteti. A szálakat/szalagokat a következő lépésben állandó sebességgel vékony acéllapra tekercselik egyirányú vagy diagonális rétegeket kialakítva. Ezt a mátrix olvadási hőmérsékletén való préselés vagy vákuumzsákos eljárás követi [13].



5. ábra: A koextrudált szalagok konszolidálásos eljárásának elvi vázlata [14]

Az eljárással létrehozható kompozit keresztmetszeti képe a 6. ábrán látható.

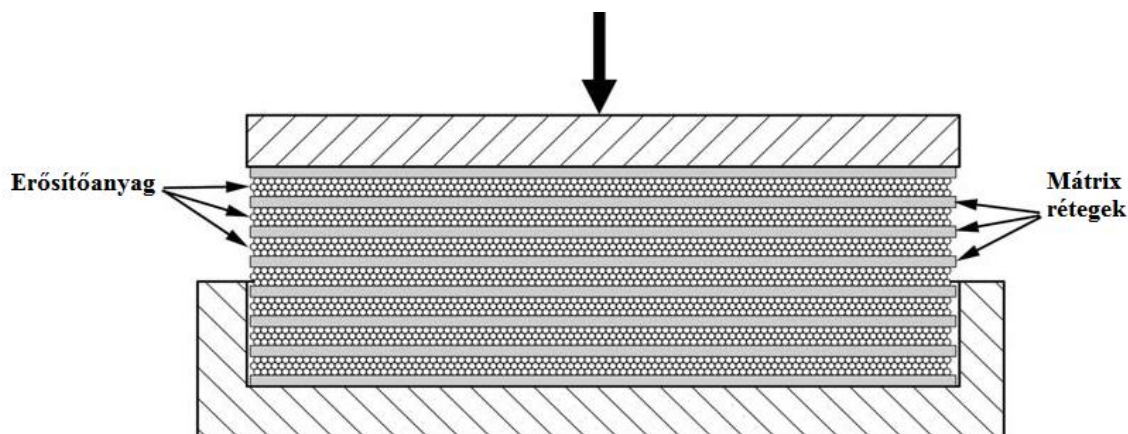


6. ábra: Koextrudált szalagok konszolidálásával készült minta mikroszkópi képe [15]

Ezen eljárás kifejlesztése Peijs és társai nevéhez fűződik. A technológia segítségével készített kompozit lapok a Lankhorst-Indutech (Sneek, Hollandia) termékként, PURE[®] márkanéven kaphatók kereskedelmi forgalomban [16]. Az eljárás előnye, hogy szélesebb feldolgozási ablakot (20-25°C) enged, mint a kompaktálás, és akár 80% száltartalmat is el lehet érni. Hátránya viszont az egymást követő bonyolult technológiai lépések, amelyek megnövelik az előállítás költségeit.

2.3. Rétegeléses eljárás

A kompaktálásos és koextrúziós önerősített kompozit gyártás is járható útnak bizonyult, de versenyképességüket visszaveti a költségességük. A két technológia közös pontjait (mátrix olvadáspontja fölötti hőmérsékleten való préselés) felhasználva született meg a rétegeléses módszer. Az új alternatíva kiküszöböli a plusz költségeket okozó lépéseket. Az alapanyag a koextrudált szalagok konszolidációs eljárásához hasonlóan egy nagyobb olvadáspontú erősítésből és egy kisebb olvadáspontú mátrixból áll. A lényegi különbséget az adja, hogy a komponensek kereskedelmi forgalomban külön-külön kaphatók. Az eljárás lényege, hogy a mátrixot és az erősítőanyagot rétegesen helyezik a kétoldali fűtött fém szerszámba, majd összepréselik. A megfelelő hőmérséklet és a terhelés hatására jön létre a konszolidáció a megolvadt mátrix és az erősítőanyag közt. Az eljárás elvi vázlatát a 7. ábra mutatja. Konszolidáció alatt azt értjük, hogy a mátrix mennyire nedvesíti az erősítőanyagot.



7. ábra: A rétegeléses eljárás elvi vázlata [4]

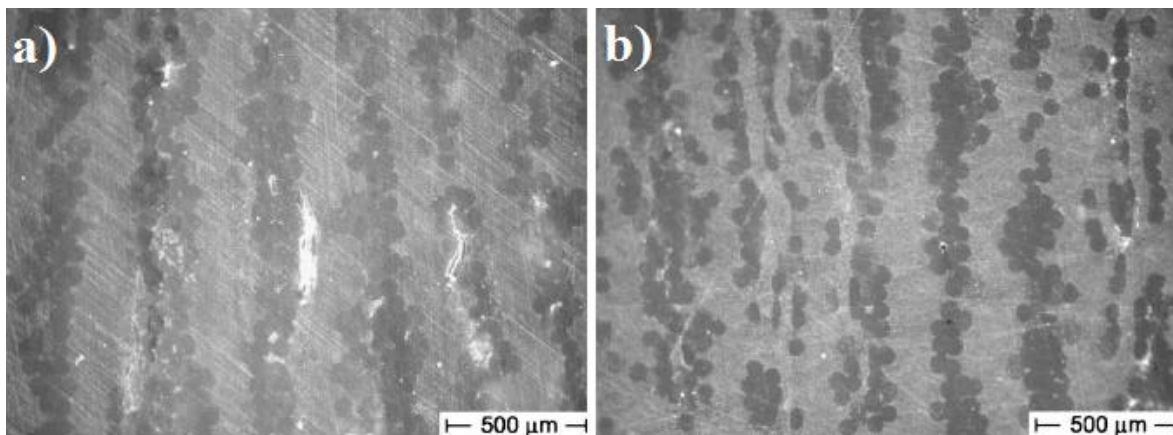
Houshyar és társai nevéhez fűződnek az első rétegeléses eljárással kapcsolatos kísérletek. Különböző átmérőjű polipropilén szálakat alkalmaztak random kopolimer (sűrűség $\rho=0,905 \text{ g/cm}^3$, MFI=0,8 g/10 perc, olvadási hőmérséklet $147,5^\circ\text{C}$, etilén tartalom $\sim 5\%$) mátrixszal. A kísérletek során a 30, 39, 50 és $68 \mu\text{m}$ átmérőjű, 250-350 MPa húzószilárdságú, és 20-30 mm hosszú szálakat alkalmaztak. A szálátmérőket optikai mikroszkóp segítségével, az olvadási hőmérsékleteket DSC vizsgálattal határozták meg. A mátrix olvadási hőmérséklete 148°C , a szálé pedig 164°C , így a feldolgozási tartományt 155 és 160°C között állapították meg. A préselést két lépésre bontották. Először egy 0,2-0,4 mm vastagságú kopolipropilén fóliára tetszőlegesen helyeztek hosszú PP szálakat, és két teflonlap között a meghatározott hőmérsékleten 5-7 percig préselték. Ezután 11-14 MPa nyomáson tartották 8-10 percig. A második lépésben az így elkészült lapokból hármat

fektettek egymásra, és az első lépésben alkalmazott paraméterekhez hasonló feltételek mellett összepréselték őket. Az így előállított darabokat vizsgálták szakítószilárdság és kúszási tulajdonságok szempontjából. Az eredmények azt mutatták, hogy a szálátmérő növekedésével a szilárdság és kúszásállóság is növekszik. A legnagyobb érték az 50 μm átmérőjű szálaknál adódott. Konszolidáció szempontjából is az 50% száltartalmat találták megfelelőnek, mivel nagyobb száltartalomnál nem tudtak megfelelő átítatottságot elérni [17, 18].

Kutatásaik közben figyelmet fordítottak az erősítőanyag struktúrájának a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatására is. Különböző geometriájú, kézzel előállított PP fonalból szőtt szöveteket vizsgáltak. A préselt lapokat az előzőekben meghatározott paraméterekkel készítették. Az eredmények alátámasztották, hogy a mechanikai tulajdonságok jelentősen függnek a szövettípustól. A szatén (5 fonalas, atlaszkötésű kelme) bizonyult a legalkalmasabbnak, mivel nagy száltartalma mellett laza szövésű, és kevés helyen törnek meg benne a szálak [19]. Egyes kísérletek során a mátrixot fólia helyett szál formájában alkalmazták. Az erősítőanyag és a mátrix szálait összekeverték, és tűnemezelt struktúrát készítettek belőlük, majd ilyen formában helyezték a présbe [20]. A száltartalom szerepét végelelemes modellezéssel is alátámasztották. A VEM modell alapján kis száltartalom esetén a szál nem képes felvenni a terhelés nagy részét. A végelelemes módszerrel számolt értékek összhangban vannak a kísérletek során kapott eredményekkel [21].

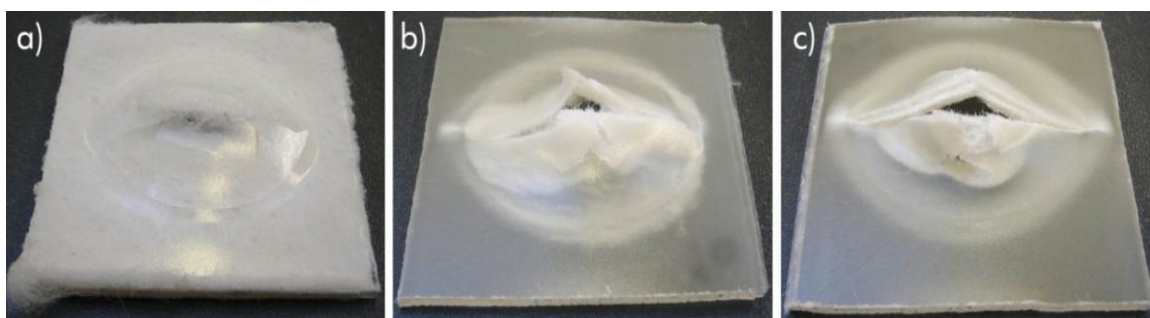
Bárány és társai vizsgálták a rétegeléssel előállított önerősítéses PP kompozitok mechanikai tulajdonságait, és azok konszolidáltsági foktól való függését. A rétegelt lapok előállításához α -PP szálát és β -PP fóliát használtak. Különböző feldolgozási hőmérséklettel (150-170°C) és állandó 2 perces hűntartási idővel, valamint különböző hűntartási idővel (2-20 perc) és állandó hőmérséklettel dolgoztak. Az így előállított lapokat statikus és dinamikus vizsgálatoknak vetették alá. Az eredmények azt mutatják, hogy a hőmérséklet nagyobb befolyással bír, mint a hűntartási idő, ha a nyomás változatlan. A préselési hőmérséklet emelésével javul a konszolidáltság, így a szakítószilárdság növekszik, a perforációs energia pedig csökken [22]. A 8. ábra különböző mértékben konszolidálódott próbatestek metszeti képét mutatja be. Vizsgálták még a β kristályos módosulattal rendelkező PP homopolimer mátrixú, szövött PP szállal erősített kompozitok mechanikai tulajdonságait is. Először β gócképzőt keverték össze gócképző nélküli PP-vel, amelyből aztán fóliát extrudáltak. Az így kapott fóliát használták fel a rétegelt lapok előállítására. A

vizsgálatok eredményeként megállapították, hogy a β -módosulatnak köszönhetően a feldolgozási hőmérséklettartomány szélesebbé válik [23].



8. ábra: Különböző mértékű konszolidáció szálerősítésénél a) 160°C-on; b) 170°C-on [22]

Ezen kívül végeztek kísérleteket random PP kopolimer fólia és nagy orientáltságú PP szálból készített kártolt és tűnemezelt paplanokból gyártott önerősítéses kompozitokon is. A különböző feldolgozási hőmérsékleten (150-170°C) és hűtési idővel (1,5-10 perc) előállított darabok konszolidáltságát fénymikroszkóp segítségével minősítették. A rétegelt lapokból próbatesteket vágtak ki ejtődárdás és szakítóvizsgálathoz. Az eredmények azt mutatták, hogy a kisebb préselési hőmérséklettel és a rövidebb hűtési idővel gyártott lapok konszolidáltsága nem megfelelő, mivel a mátrix nem tudja megfelelő mértékben átítani az erősítőanyagot. Megállapították, hogy a kívánt konszolidáció eléréséhez a 165°C és a 1,5 perc a legmegfelelőbb [24]. A 9. ábra a préselt lapokból kimunkált próbatestek láthatóak az ejtődárdás vizsgálat után.



9. ábra: Préselési hőmérséklet hatása a konszolidációra és az önerősítéses kompozit tönkremeneteli formájára [24] a) rossz konszolidáció; b) jobb konszolidáció; c) jó konszolidáció [4]

A kutatások kiterjedtek az optimális mátrix anyag vizsgálatára is. Azonos erősítőanyag és gyártási paraméterek mellett különböző polipropilén fajtákat használtak, nevezetesen α - (monoklin, α -PP), illetve szelektív gócképzők segítségével előállított β -módosulatú (trigonális, β -PP) izotaktikus PP homopolimert és random PP kopolimert (α -rPP, β -rPP).

Az alapanyagok olvadási csúcshőmérsékletét az 1. táblázat foglalja össze. A β -PP ütésállósága és szívóssága jobb, olvadási csúcshőmérséklete kisebb, mint az α -módosulatnál, vagyis szélesebb feldolgozási hőmérséklettartományt biztosít. Az eredmények alapján összességében a β -PP mátrix hatásosabbnak bizonyult, mint a rPP mátrix. A kompozit lapok előállításához minden esetben erősen orientált PP szalagokból szőtt egyszerű szövet szolgált erősítőanyagként (névleges tömeg 180 g/m^2 , vastagság $180 \mu\text{m}$, olvadási hőmérséklet 172°C , szakítószilárdság $465 \pm 32 \text{ MPa}$) [24, 25].

Alapanyag	Olvadási csúcshőmérséklet T_m [$^\circ\text{C}$] (DSC mérés alapján)
α -PP	164,4
β -PP	151,5
α -rPP	142,5
β -rPP	131,3
α -PP szövet	173,4

1. táblázat: PP módosulatok olvadási csúcshőmérséklete [25]

Az erősítőanyag geometriájától nagymértékben függ a kompozit alakváltozással szembeni ellenállása, szakítószilárdsága és hajlító merevsége, tehát az erősítőszerkezet kialakításának hatása nem elhanyagolható. Az erősítőstruktúrák szempontjából a kötött és a kártolt szövet vizsgálata során kiderült, hogy mindkettő alkalmazható erősítés gyanánt. Nehézséget okoz viszont a kívánt erősítő száltartalom elérése, mivel az erősítésben csak a megfelelő irányú szálak vesznek részt. A kötött típusnál jobb mechanikai tulajdonságok tapasztalhatóak, mint a kártolt szövetnél [26].

Zhang és társai kutatásaik középpontjába PET erősítőanyagból (szalag) és PET kopolimer fóliából előállítható önerősítéses kompozitokat helyezték. A kereskedelemben kapható PP kompozitok felhasználási tartományának gátat szab a polipropilén viszonylag alacsony üvegesedési átmenet hőmérséklete ($T_g = \sim 15^\circ\text{C}$) és alacsony olvadáspontja ($T_m = \sim 165^\circ\text{C}$), ezzel korlátozva magas hőmérsékleten történő alkalmazásukat. Ezért az olyan polimerek, amelyek magasabb T_g -vel és magasabb T_m -mel rendelkeznek, az érdeklődés középpontjába kerültek a fejlesztések során. Ezen keletkező űr betöltésére a PET lehetséges megoldást jelenthet, mivel üvegesedési hőmérséklete $67\text{--}70^\circ\text{C}$ míg olvadási hőmérséklete $260\text{--}290^\circ\text{C}$ közötti tartományban változhat. Kísérleteik során lapos fém keretre tekercselték a PET szalagot, a száltartalom beállítására és a mátrix fázis kellő mennyiségű biztosítására kilenc mátrix fóliát tekercseltek hat réteg PET szalag közé. Ily

módon 70 tömeg%-os száltartalmú kompozit lapot tudtak előállítani. A préselési nyomás 0,12-2,4 MPa, a préselési hőmérséklet pedig 120 és 200°C között változott. A legjobb eredményt, megfelelő konszolidációt 160 és 180°C között érték el 0,6 MPa nyomás alkalmazásával. A préselt lapot összehasonlították egy, a kereskedelemben kapható 30 tömeg% üvegszál tartalmú PET kompozittal, illetve kompaktálással készített önerősítéses PET kompozittal is, amely igazolta a préselt lap jó mechanikai tulajdonságait [27].

2.4. Szelektív hevítés

A legújabb kísérleti eljárás önerősített kompozitok előállítására a szelektív hevítéses módszer. Az eljárást a korlátozott feldolgozási hőmérséklet teszi indokolttá. A mátrixanyagba kevert adalék külső energiaforrás hatására felhevül, és lehetővé teszi, hogy csak a mátrix olvadjon meg anélkül, hogy hatással lenne az erősítőanyagra. Az eljárás granulátumnál és lemez geometriájú anyagoknál egyaránt alkalmazható. A kutatások a fűtés szempontjából optimális idő, energia és adalék mennyiség kapcsolatára fókuszálnak. A fűtő hatás lehet mikrohullámú vagy indukciós energia. Az erősítőanyag tartalmú granulátum előállítása történhet a mátrix ömledék állapotba hozásával (pl.: pultrúzió) vagy porkeveréses módszerrel. Az önerősített termék készülhet fröccsöntéssel vagy préseléssel. Szelektív melegítéses módszerrel az erősítőanyag nélküli polipropilénhez képest jobb mechanikai tulajdonságokat értek el [28].

2.5. Fröccsöntéssel feldolgozható, önerősítéses kompozit előgyártmány

Korábbi szakdolgozatok és diplomamunkák keretein belül kísérletek folytak a fröccsöntési célra alkalmas előgyártmányok előállítására. Alapanyagként a Stradom S.A. által gyártott 1200 dtex lineáris sűrűségű fekete PP multifilament és a TVK által gyártott Tipplen R959A PP granulátum szolgált. Mivel az üvegszállal ellentétben a PP szálakat a fröccsöntőgép csigája nem oszlatja el egyenletesen a mátrixban, először a meghatározott hosszúságúra vágott szálakat porkeverő berendezés segítségével próbálták összekeverni a por vagy granulátum formájú mátrixanyaggal. A módszer a szálak elektrosztatikus feltöltődése miatt nem hozott eredményt. Az erősítőanyag csomókba állt össze, a homogén eloszlás nem valósult meg, a fröccsgép fűvókája eldugult. Másik alternatíva a bevonatolás volt. Az előfeszített multifilamentre ráextrudálták a mátrixot. Az így kapott bevonatolt szál darabolásával jött létre a granulátum. Ez a módszer sem hozott átütő eredményeket. A

szálak homogén eloszlása még mindig nem volt biztosított, ráadásul a száltartalom is csupán 10% körülire adódott. Bár a mikroszkópi vizsgálatok alapján jó adhéziós kapcsolat alakult ki az erősítőanyag és a mátrix közt, az elégtelen száleloszlás és az üregek miatt a mechanikai tulajdonságok nem hozták a kívánt eredményt [28].

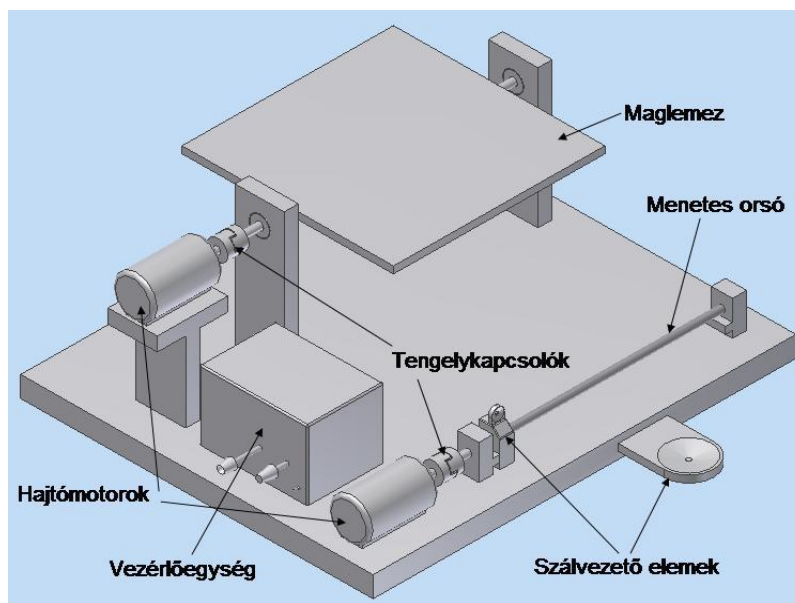
Későbbi kísérletek során optimalizálták a bevonatolások gyártástechnológiát, a fröccsöntési paramétereket, vizsgálták a szál hosszának a kész fröccsöntött kompozit tulajdonságaira és a feldolgozhatóságra gyakorolt hatását. A bevonatoláshoz használt extruderszerszám továbbfejlesztésre került. Az elhúzási sebesség optimális értékét 10 m/percben állapították meg, ami mellett a bevonat egyenletes vastagságú lett, és nagyobb száltartalmat tudtak elérni. A fröccsöntési paraméterek változtatásával további tulajdonság javulást értek el, viszont a mátrix és a szál közti folytonos kapcsolat még mindig nem volt kielégítő. Végül a szálak megfelelő eloszlásának biztosítását a rétegelések előgyártmány alkalmazásával érték el. A már említett módszerrel gyártott jó konszolidáltságú préselt lapok darabolásával előállított granulátum alkalmas fröccsöntött termék előállítására. A kapott próbatestek mechanikai tulajdonságai biztatóak, jó alapul szolgálnak a további kísérletekhez [29].

3. Gyártástechnológiai lépések

Ebben a fejezetben bemutatjuk az általunk alkalmazott gyártástechnológiai lépéseket, amelyek segítségével előállítottuk az önerősítéses kompozit lapokat, illetve a későbbi fröccsöntés alapanyagául szolgáló előgyártmányt.

3.1. Tekercselés

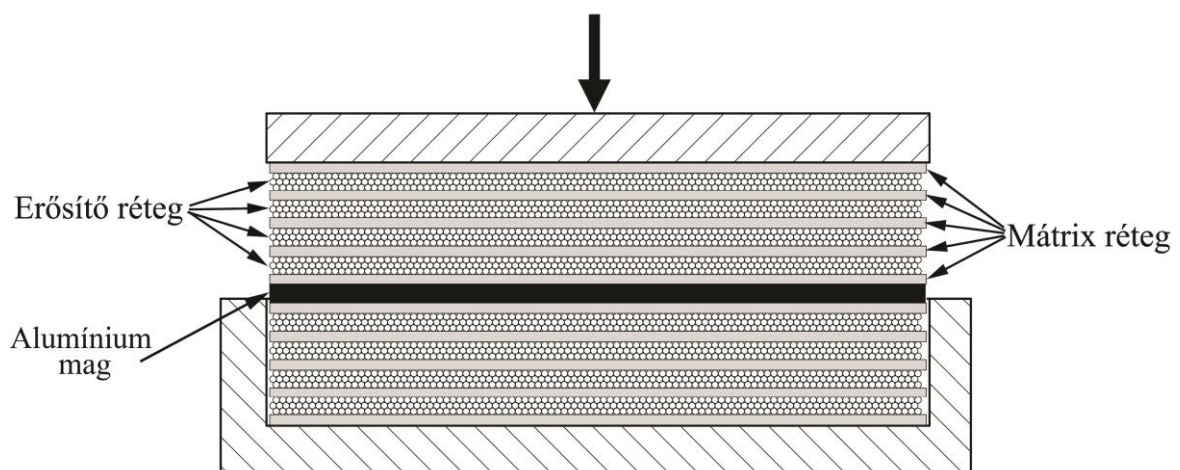
Az önerősítéses kompozit lap elkészítéséhez első lépésként egy 300x300 mm-es alumínium maglemezre tekercseléssel elhelyeztük az erősítőanyag struktúrát egyirányban (UD) valamint keresztirányban (CP). A feltekercselt erősítő rétegek közé a mátrix anyagául szolgáló, méretre vágott fóliát raktunk, a nagy száltartalom (~80 m%) elérése érdekében 1-1 fóliát rétegenként. Az előkísérletek rámutattak, hogy a préselés közben megolvadt PET rátapad az Al lapra, aminek következtében a kompozit magról való eltávolítása nem lehetséges roncsolás nélkül. A probléma áthidalása érdekében az alumínium felületét teflon réteggel vontuk be a PETG-PET rendszer esetén. A PP kompozitok gyártása közben ilyen probléma nem merült fel, ebben az esetben nem szükséges a teflonbevonat használata. Az erősítőanyag préselés közben fellépő relaxációjának csökkentése céljából a multifilamentet mind a PP, mind a PET esetében egy előfeszítő elemen vezettük keresztül. A felhasznált berendezés vázlatja a 10. ábrán látható.



10. ábra: A tekercselő berendezés elvi ábrája [29]

A berendezés az alumínium magot adott - fokozatmentesen állítható – szögsebességgel hatja egy villanymotor segítségével. A szál előtolását a maglemez forgástengelyével párhuzamos mozgást biztosító menetes orsó teszi lehetővé. A menetes orsóhoz kapcsolódó szálvezető elem szögsebessége is fokozatmentesen állítható egy villanymotor segítségével. Ezen szabályozási lehetőségek alkalmasak arra, hogy különböző alapanyagú (ezáltal különböző sűrűségű) mátrix, illetve erősítőanyag esetén is beállítható legyen a kívánt száltartalom a mátrixanyag megfelelő adagolásán felül. A tekercselést követően, miután kialakítottuk a megfelelő számú erősítőanyag – mátrixréteg struktúrát, a maggal együtt eltávolítottuk a tekercselt lapot és a présbe helyeztük.

A száltartalom beállítása a korábban említett módon, rétegenként 1-1 mátrixanyag és erősítőanyag felhasználásával történt. Az elkészített kompozit lapok 4 réteg erősítőanyagot és 5 réteg mátrixanyagot tartalmaztak oldalanként, ahogy a 11. ábrán látható.



11. ábra: A kompozit lapok rétegrendjének elvi ábrája

A névleges száltartalom megállapítása a következő módon zajlott PP esetén: egy darab 300x300 mm-es mátrix fólia tömege $m_{\text{fólia}} = 4$ g, az alumínium mag tömege $m_{\text{mag}} = 1465$ g. A mátrix össztömegét egy fólia tömege és a tekercselt lapban lévő fóliák szorzata határozza meg. Ha a tekercselést követően mért tömegből kivonjuk az alumínium mag tömegét, eredményül a kompozit tömegét kapjuk, amelyből a mátrix tömegét kivonva az erősítőanyag tömegét kapjuk. A kompozit és az erősítőanyag tömegének hányadosa adja meg a száltartalmat. Mind UD, mind CP erősítésű kompozit lapok előállításánál esetén 80 tömeg%-os névleges száltartalmat állítottunk be. A névleges száltartalom megnevezés azért fontos, mivel a tekercselő berendezés fordulatszámának és előtolásának állítása szubjektív módon történik két potméter segítségével. A préselések alkalmával előállított kompozit lapok számított száltartalmait a melléklet (1. /m táblázat) tartalmazza.

3.2. Préselés

A második technológiai lépés a préselés. A préselés elvégzéséhez egy Schwabenthan Polystat 300S típusú présgépet használtuk (12. ábra). Az optimálisnak adódott préselési paramétereket a

2. táblázat tartalmazza mindkét alkalmazott anyag esetén. Az alkalmazott nyomást, hőmérsékletet és időtartamokat korábban elkészített, eltérő paraméterekkel előállított próbadarabok vizuális vizsgálata során szerzett tapasztalataink segítségével állapítottuk meg.

	Hőmérséklet [°C]		Idő [s]		Nyomás [MPa]	
	PP	PET	PP	PET	PP	PET
Hőntartás	180	210	240	240	0	0
Préselés	180	210	240	360	5,26	5,26
Hűtés	45	45	300	300	5,26	5,26

2. táblázat: Préselési paraméterek

A préselés folyamata három részre bontható. Első lépésként a korábban tekercselt alumínium magot a présbe helyeztük, amelyet előzőleg az optimális préselési hőmérsékletre fűtöttünk fel. Ekkor történik a 4 perc időtartamú hőntartás, ahol a polimernek lehetősége van felvenni a préselési hőmérsékletet. Következő lépés a préselés, ami 5,26 MPa nyomáson történt, és a PP esetében 180 amíg a PET esetében 210°C-on valósult meg. Végül a préseléssel azonos nyomáson visszahűtöttük a darabot, majd a kész kompozitot a présből való eltávolítása után az alumínium magról is leválasztottuk ily módon két préselt lapot kapva.



12. ábra Schwabenthan Polystat 300 S típusú présgép

A fenti lépéseket alkalmazva állítottuk elő UD és CP erősítéssel ellátott kompozit lapokat úgy PP, mint PET esetében. Az előállított mennyiséget tekintve annyit préseltünk a lapokból, amely darabszám a vizsgálati módokhoz kellő számú próbatestet biztosítottak.

3.3. Fröccsöntés

Az UD PP kompozit lap azon túl, hogy önmagában is minősítésre került – összehasonlítva a CP PP, illetve az UD PET és CP PET lapokkal, elhelyezve őket a kereskedelemben kapható önerősítéses kompozit lapok jellemzőihez képest – a fröccsöntés előgyártmánya is volt egyben.

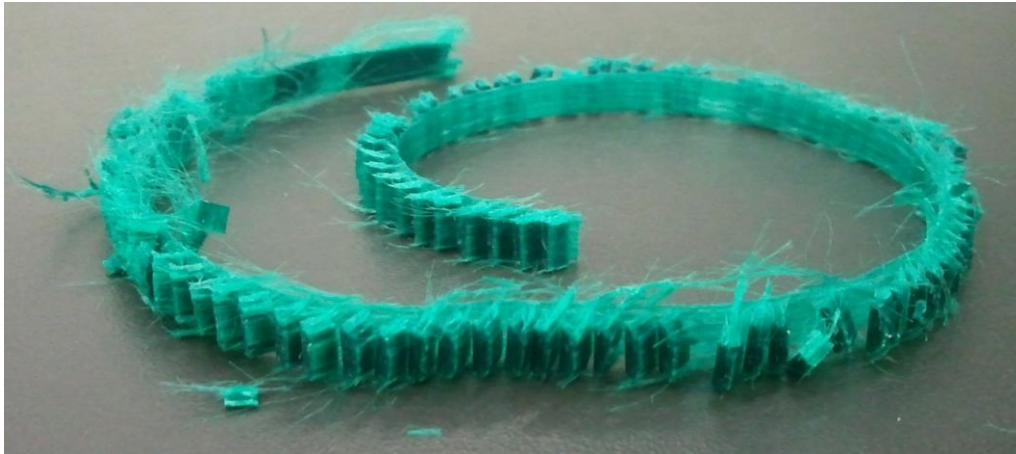
3.3.1. Granulátum előállítása

Az UD PP kompozit lapokból két lépésben készítettük el a fröccsöntésre alkalmas önerősítéses kompozit előgyártmányt („granulátum”). Először a préselt lapot a száliránnyal párhuzamosan 5 mm széles szalagokra vágtuk karos papírvágógép segítségével. Az így kapott ~270 mm hosszú szeleteket a tanszék kompozit laborjában található fagyasztó szekrénybe raktuk, ahol -30°C-os hőmérsékleten tároltuk 12 órán át. Ezt követően a szeletelt előgyártmányt folyékony nitrogént tartalmazó kettősfalú edénybe helyeztük, ahogy a 13. ábrán is látható, majd 5 perc elteltével egy Labtech LZ-120/VS típusú granuláló berendezéssel 5 mm hosszú darabokra vágtuk őket.



13. ábra: PP kompozit lap folyékony nitrogénben

A hűtés azért volt indokolt, mert szobahőmérsékleten a granuláló berendezés nem tudta teljesen szétvágni a szalagot, ahogy azt a 14. ábra is mutatja.

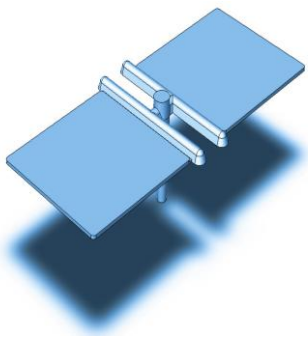


14. ábra: Szobahőmérsékleten granulált kompozit előgyártmány

A hűtés ötlete abból a feltételezésből indult, hogy a polipropilén jóval az üvegesedési hőmérséklete alá hűtve mechanikai szempontból ridegen viselkedik, így a granuláló berendezés vágóele el tudja vágni, „törni” az anyagot. Az elkészült granulátum 5x5 mm-es nagysága a korábbi szakdolgozatban fröccsöntésre sikerrel felhasznált méret figyelembevételével került meghatározásra [31].

3.3.2. Fröccsöntés

A granulátumból egy Arburg Allrounder Advance 370S 700-290 típusú fröccsöntő gép segítségével lapka próbatesteket fröccsöntöttünk. A felhasznált szerszám 80x80 mm-es, filmgát beömléssel ellátott, mint a korábbi szakdolgozatban is. Az alkalmazott technológia a korábbi technológiai paramétereket figyelembe véve a mátrix anyagával került beállításra [31]. Az alkalmazott fröccsöntési paramétereket és a fröccsöntött lapka próbatestet a 3. táblázat tartalmazza.

Ciklusidő [s]	200					
Utónyomás ideje [s]	10					
Hűtési idő [s]	20					
Csigaforgási sebesség [1/perc]	300					
Befröccsöntési sebesség [mm/s]	100					
Befröccsöntési nyomás [bar]	1800					
	1. zóna	2. zóna	3. zóna	Fúvóka	Szerszám	
Hőmérséklet [°C]	155	155	160	165	40	

3. táblázat: Fröccsöntési paraméterek és lapka próbatest

A fröccsöntés során azt tapasztaltuk, hogy az előimpregnált granulátumot a plasztifikáló egység csigája, stabil adagsúly felvétellel fel tudta venni. Egyes darabok esetében viszont a granulátum végein, a nem tökéletes granulálás következtében elemi PP szálak lógtak ki, amelyek összekapcsolódtak és megakadályozták az anyag szabad áramlását a garatban. Ezeknél az anyagoknál tömködő fa segítségével adagoltunk.

4. Felhasznált anyagok és vizsgálati módszerek

A felhasznált anyagokat és vizsgálati módszereket az alábbi fejezetben mutatjuk be.

4.1. Polipropilén kompozit alapanyagai

A polipropilén kompozit előállításához mátrixként a Tiszai Vegyi Kombinát (TVK) által gyártott Tipplen R959A PP random kopolimerből készült 50 µm vastagságú fólia szolgált. Az alapanyag gyártó által megadott tulajdonságait a 4. táblázat foglalja össze.

	Mérési szabvány	Érték
Folyásindex (MFR) (230°C/2,16 kg) [g/10 perc]	ISO 1133	45
Rugalmassági modulus (hajlításból) * [MPa]	ISO 178	1050
Rugalmassági modulus (húzásból) * [MPa]	ISO 527-1,2	950
Húzószilárdság * [MPa]	ISO 527-1,2	27,5
Nyúlás folyásnál * [%]	ISO 527-1,2	13
Izod ütőszilárdság (bemetszett, 23 °C) [kJ/m ²]	ISO 180/1A	5
Lehajlási hőmérséklet (HDT) (0,45 N/mm ²) * [°C]	ISO 75-1,2	84
Rockwell keménység* (R skála)	ISO 2039/2	78

* ISO 1873-2 szabvány szerinti fröccsöntött próbatesteken végzett nagyszámú mérések átlageredményei

4. táblázat: Az R959A PP fizikai tulajdonságai [30]

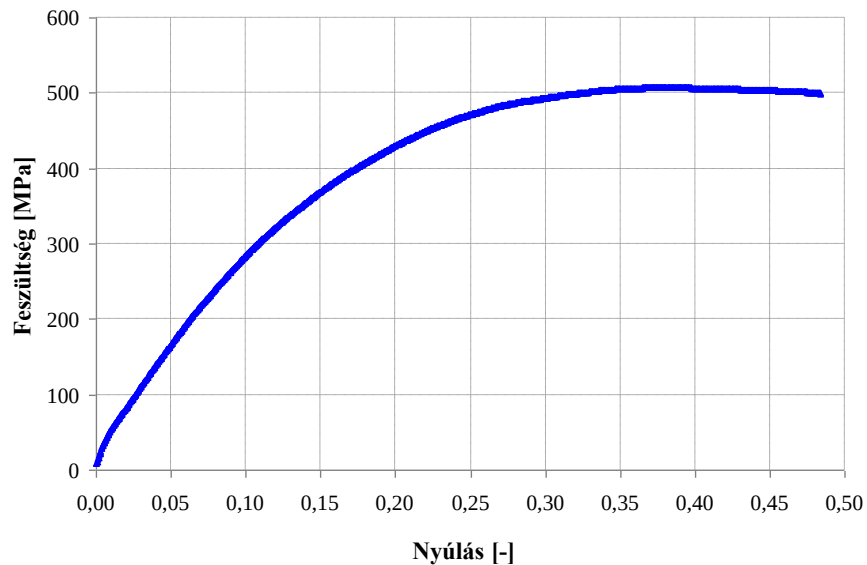
Erősítőanyagként a lengyel Stradom S.A. cég által gyártott újfajta nagy orientáltságú, 3300 dtex lineáris sűrűségű hPP multifilamentet alkalmaztuk. A szál mechanikai és termikus tulajdonságai és szálátmérője egy korábbi szakdolgozat [31] során mérésre kerültek, a későbbiekben ezeket az adatokat tekintjük mérvadónak.

Az elemi szál átmérője korábbi mérés alapján $40,1 \pm 1,8$ µm. Az elemi szálszakító vizsgálattal meghatározott húzószilárdságot és rugalmassági moduluszt a 5. táblázat tartalmazza.

	Maximális erő [N]	Húzószilárdság [MPa]	Rugalmassági modulus [MPa]
Átlag	$0,735 \pm 0,054$	$581,0 \pm 30,0$	6432 ± 491

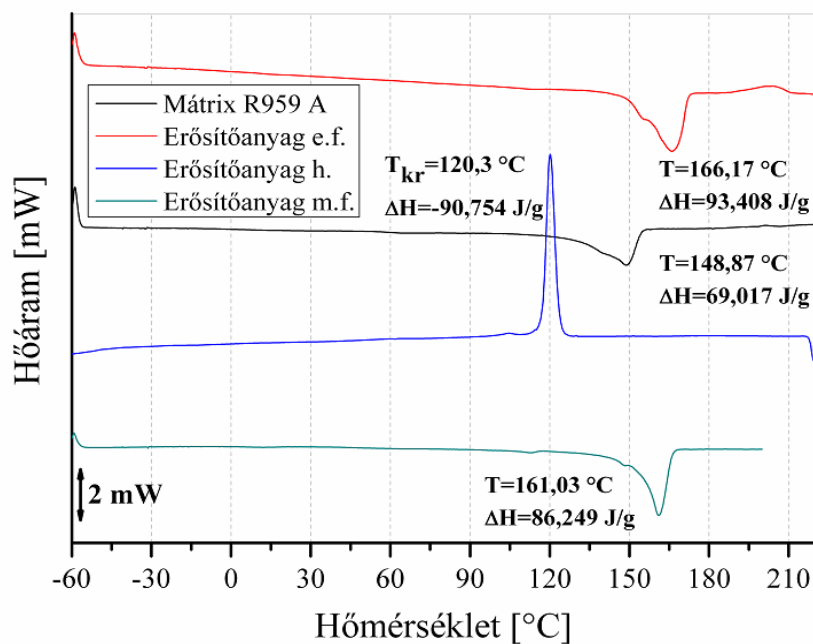
5. táblázat: PP elemi szálszakítás eredményei [31]

Az elemi szál jellemző szakítógörbéjét az 15. ábra ábra mutatja.



15. ábra: PP elemi szál jellegzetes szakítógörbéje [31]

Differenciál pásztázó kalorimetria (DSC) vizsgálat alapján szintén az említett szakdolgozat eredményeit felhasználva a feldolgozhatósági hőmérsékletet megállapítható, tekintettel a mátrix és az erősítőanyag olvadási hőmérsékletére (16. ábra). Ennek alapján a Tipplen R959A PP olvadási csúcshőmérséklete 148°C. Az erősítőanyag olvadási csúcspontja az első felfűtéskor 166°C, a második felfűtéskor pedig 161°C. A hűtés során mért kristályosodási hőmérséklet 120°C. A mátrix és az erősítőanyag DSC görbéit a 16. ábra mutatja. Az olvadási hőmérséklet terhelés alatt nagyobbra adódik. A nyomás és az előfeszítés miatt nem olvad meg a szál a 180°C-os préselés közben. Sajnos nincs rá mód, hogy terhelés alatt lévő erősítőanyagon DSC vizsgálatot végezzünk [31].



16. ábra: A mátrix és az erősítőanyag DSC görbéi
(e.f.: első felfűtés, h.: hűtés, m.f.: második felfűtés) [31]

4.2. Poliészter kompozit alapanyagai

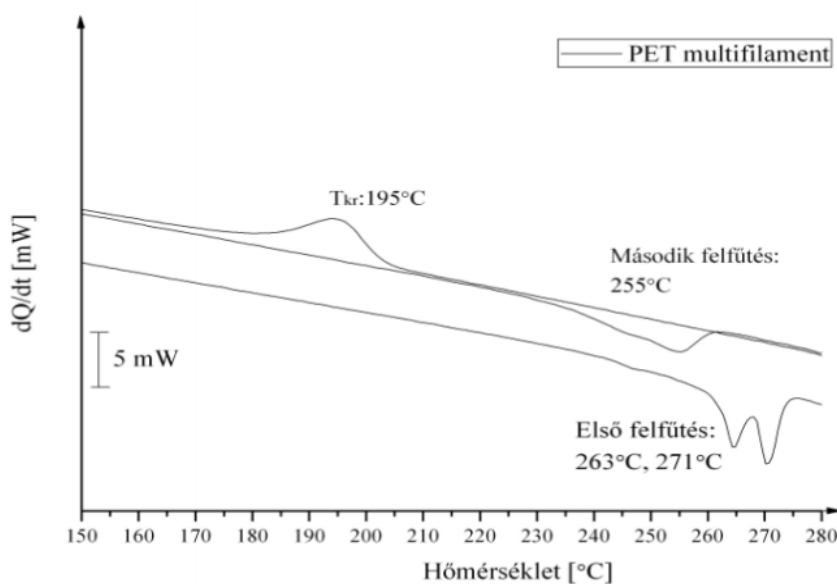
A polietilén tereftalát, vagyis a PET a részben kristályos, hőre lágyuló polimerek közé tartozik. Kristályosságának mértéke a feldolgozás utáni hűtés sebességével áll összefüggésben. Gyors lehűtéssel a közel teljesen amorf, míg lassabb hűtéssel a nagymértékű kristályosság felé tolható el az anyag szerkezete. Az alapanyag megnövekedett népszerűsége a PET-ből készült flakonok és palackok elterjedésével magyarázható. Ez a folyamat kihatással volt a PET árára is, amely tíz év alatt közel harmadára csökkent (2000-ben akár 1,5 USD/kg áron hozzájuthattunk) [2].

Az általunk felhasznált mátrix anyagául szolgáló PETG egy glikollal módosított polietilén tereftalát, tisztán amorf szerkezetű termoplasztikus műanyag, amely nagy merevséggel, keménységgel és szívóssággal jellemezhető. Mikroszerkezetéből adódóan átlátszó, emellett nagy tisztaságú, könnyen festhető és feldolgozása sem ütközik nehézségekbe. Az anyagból (Eastman 6763) gyártott 50 μm vastagságú fólia látta el a mátrix szerepét. A 6. táblázat tartalmazza az alkalmazott mátrixanyag gyártó által megadott mechanikai tulajdonságait.

	Mérési szabvány	Érték
Sűrűség [g/cm ³]	ISO 1183/D	1,27
Vízfelvétel [%]	ISO 62	0,13
Szakító szilárdság [MPa]	ISO 527-1,2	50
Szakadási nyúlás [%]	ISO 527-1,2	100
Rugalmassági modulusz (húzásból) [MPa]	ISO 178	2100
Rugalmassági modulusz (hajlításból) [MPa]	ISO 178	2000
Hajlító szilárdság [MPa]	ISO 178	68
Izod ütőszilárdság (bemetszett, 23 °C) [kJ/m ²]	ISO 180/1A	6,2
Lehajlási hőmérséklet (HDT) (1,8 N/mm ²) [°C]	ISO 75-1,2	64
Rockwell keménység (R skála)	ISO 2039/2	109

6. táblázat: Az EASTMAN 6763 PETG fizikai tulajdonágai [32]

Erősítőanyagként a Formosa Chemicals & Fibre Corporation által gyártott PET multifilamentet használtunk fel. A feldolgozhatósági hőmérséklettartományt a tanszék laborjában korábban elvégzett DSC vizsgálatok görbéiből állapítottuk meg (17. ábra)



17. ábra: A felhasznált PET anyag DSC görbéje [33]

Az erősítőanyag mechanikai tulajdonságait az 7. táblázat tartalmazza. Az elemi szál átmérője $25,21 \pm 1,37 \mu\text{m}$.

	Maximális erő [N]	Húzószilárdság [MPa]	Rugalmassági modulus [MPa]
Átlag	$0,464 \pm 0,045$	$930,5 \pm 70,2$	12351 ± 1551

7. táblázat: PET elemi szálszakítás eredményei [33]

4.3. Vizsgálati módszerek

Az alábbiakban bemutatjuk, milyen eszközöket használtunk a préselt önerősítéses kompozit lapok, illetve fröccsöntött próbatestek vizsgálatához.

4.3.1. Optikai mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp

A négy különböző préselt lapból, tehát az UD és CP erősítésű PP kompozitból, illetve a megegyező erősítőstruktúrával rendelkező PET lapból egy-egy mintát gyantába ágyaztunk, majd keresztmetszeti csiszolatot készítettünk, Stuers automata polírozó berendezés segítségével. A kompozit lapok mikroszkópi vizsgálatát Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóp (18. ábra) és Jeol JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp (19. ábra) segítségével végeztük. A vizsgálat középpontjában a konszolidáltság minősítése állt. Az elektronmikroszkópos képekhez minták felületét vékony aranyréteggel vontuk be a vizsgálhatóság érdekében.



18. ábra: Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóp

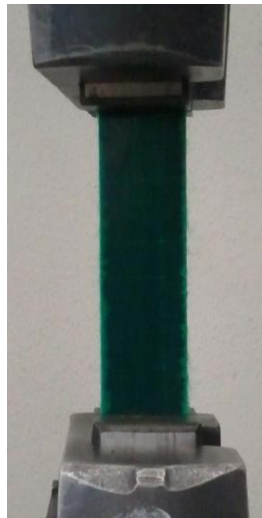


19. ábra: Jeol JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp

4.3.2. Szakítóvizsgálat

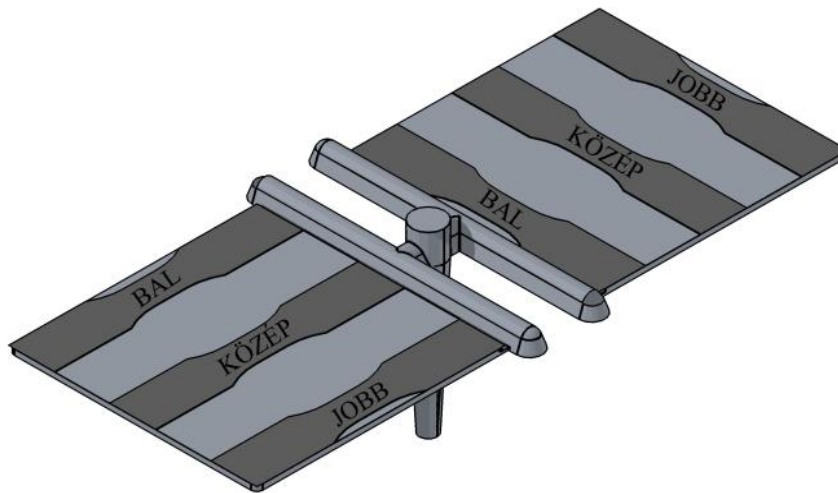
A szakítóvizsgálat elvégzése közben az MSZ EN ISO 527 szabvány szerint jártunk el. A vizsgálat során állandó szakítási sebesség mellett addig terheljük a próbatestet hosszirányban, amíg az szét nem szakad vagy pedig a terhelés illetve a hosszváltozás eléri egy előre meghatározott értéket. A mérés során rögzítjük a próbatestre ható erőt és a próbatest nyúlását. A préselt lapok és a fröccsöntött próbatestek szakítását ZWICK Z020 típusú univerzális szakítógéppel (maximális terhelőerő 20 kN, sebességtartomány 0,001-750 mm/perc) végeztük. A préselt lapokból 20×150 mm méretű próbatesteket vágunk ki, melyekből 10-10 próbatestet vizsgáltunk PP illetve PET esetében is. A mérések szobahőmérsékleten, 39,7% átlagos páratartalom mellett, 5 mm/perc szakítósebességgel

zajlottak. A PP kompozit lapok átlagos vastagsága $1,7 \pm 0,1$ mm, míg a PET kompozit lapok vastagsága $1,45 \pm 1,0$ mm. A jellemző mérési elrendezést a 20. ábra mutatja.



20. ábra: A szakító vizsgálat mérési elrendezése

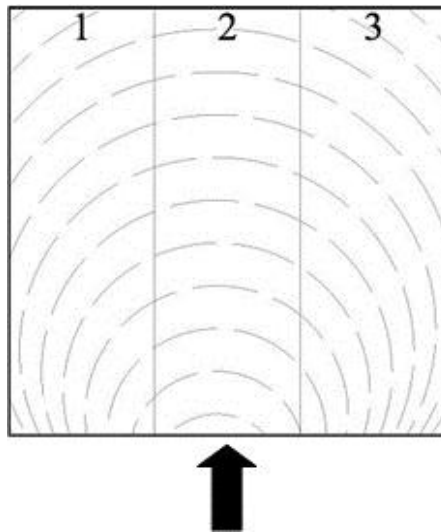
A fröccsöntéssel gyártott lapka próbatestekből az MSZ EN ISO 8256:2000 szabvány szerint 3-as típusú piskóta próbatesteket készítettünk egy erre alkalmas stancoló kés és golyós prér segítségével. Egy fröccsöntési ciklus után gyártott lapka próbatestből, amely két lapkát tartalmaz, hat darab piskóta próbatest került kimunkálásra (21. ábra).



21. ábra: Piskóta próbatestek kimunkálásának helye

A területek meghatározása során – ahonnan a próbatesteket kimunkáltuk – azt tartottuk szem előtt, hogy a várható kitöltési kép (22. ábra) miatt a szálirány, a szálak irányultsága pontról pontra változik, amely hatással van a mechanikai tulajdonságokra. Ezeket a piskóta próbatesteket szakítóvizsgálatnak vetettük alá, szobahőmérsékleten, 39,3% páratartalom mellett és 5 mm/perc szakítósebességet alkalmazva. A mérési

elrendezést a 23. ábra mutatja. A szakítóvizsgálatok során a mátrixanyagból készített próbatesteket tekintettük referenciának.



22. ábra: Fröccsöntés során kialakuló kitöltési kép sematikus ábrája



23. ábra: Piskóta próbatest mérési elrendezése

A mérések kiértékelését a MSZ EN ISO 527-1:1999 szabványban leírtak alapján végeztük. A préselt lapok és a fröccsöntött termékek esetében is számoltunk húzószilárdságot (σ_M), rugalmassági modulust (E_h) és nyúlást (ϵ). A PP alapanyag adatait korábbi azonos beállításokkal gyártott és vizsgált értékek alapján vettük figyelembe. A szakítóvizsgálattal kapott eredmények átlagából határoztuk meg az egyes anyagok jellemző értékeit. A számításokat az alábbi képletekkel végeztük:

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{A_0} [MPa], \quad (1)$$

ahol $F_{\max}$ [N] a maximális szakítóerő és A_0 [mm²] a kezdeti keresztmetszet.

$$E_h = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [\text{MPa}], \quad (2)$$

ahol σ_1 [MPa] az $\varepsilon_1=0,0005$ relatív nyúláshoz tartozó feszültség, σ_2 [MPa] az $\varepsilon_2=0,0025$ relatív nyúláshoz tartozó feszültség.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} [\%], \quad (3)$$

ahol L [mm] a befogópofák közötti eredeti távolság, ΔL [mm] a befogópofák közötti távolság növekedése [31].

4.3.3. Ejtődárdás vizsgálat

Az ejtősúlyos vizsgálatokat CEAST Fractovis 7685 típusú berendezés segítségével hajtottuk végre (24. ábra). Az mérés során alkalmazott beállítások:

Ejtődárda átmérője:	20 mm
Tömege:	23,620 kg
Magasság:	1,943 m
Maximális energia:	450 J
A sebesség becsapódáskor:	6,17 m/s
Alátámasztás átmérője:	40 mm
Vizsgálati hőmérséklet:	22,9°C

A mérési elrendezés képe a 25. ábrán látható.

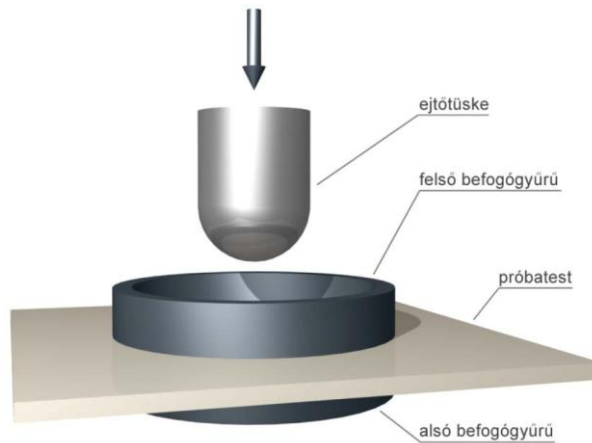


24. ábra: CEAST Fractovis 7685 típusú berendezés

Az ejtődárdás vizsgálat eredményeiből meghatároztuk a perforációs energia (E_p) értékét a következő összefüggés segítségével:

$$E_p = \frac{E_{\max}}{B} \left[\frac{J}{\text{mm}} \right], \quad (4)$$

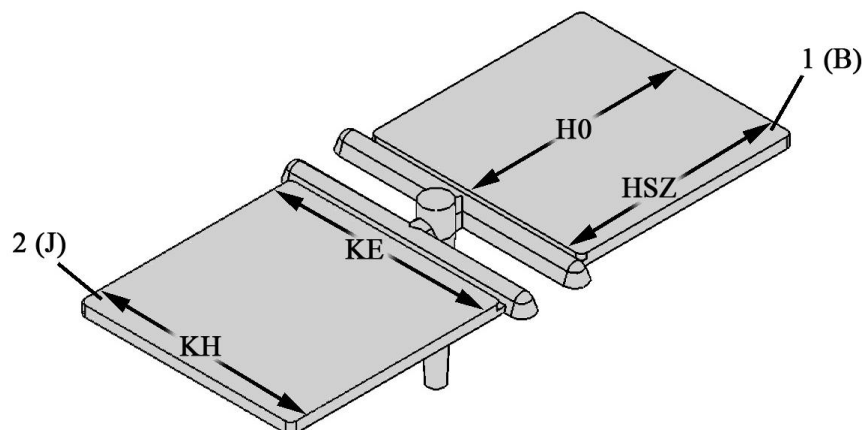
ahol $E_{\max}$ a teljes törési energia [J], B a próbatest vastagsága [mm].



25. ábra: Ejtődárdás vizsgálat mérési elrendezés

4.3.4. Zsugorodás vizsgálat

A vizsgálat során a fröccsöntéssel készült próbatest előre meghatározott helyein (26. ábra) a gyártást követő 1, 4, 24, 48 és 168 órában mértük a zsugorodást. A méréseket a leolvasási pontatlanságból származó szórás minimalizálása érdekében egy ember végezte, Mitutoyo 500-162-20/58 tolómérő segítségével. A mérés célja annak megállapítása, hogy a hőre lágyuló szállal erősített kompozit zsugorodási viselkedése mennyiben tér el a mátrixanyagból fröccsöntött azonos kiinduló méretű lapka próbatesthez képest. A K betű a folyási irányra vett keresztirányt, a H pedig a hosszirányt jelöli.



26. ábra: Lapka próbatest zsugorodás mérés helyei

5. Önerősített polimer kompozit lapok tulajdonságai

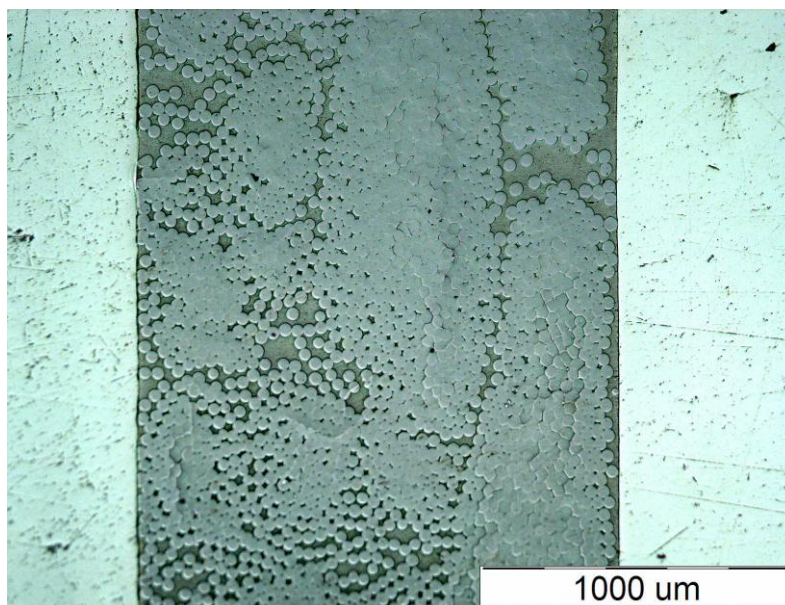
Az alábbi fejezetben a préselt kompozit lapok tulajdonságait foglaljuk össze. A különböző típusú kompozitok átlagos száltartalmát a 8. táblázat mutatja.

Típus	Átlagos száltartalom [%]
UD PP	$79 \pm 1,2$
CP PP	$86 \pm 0,74$
UD PET	78 *
CP PET	79 *

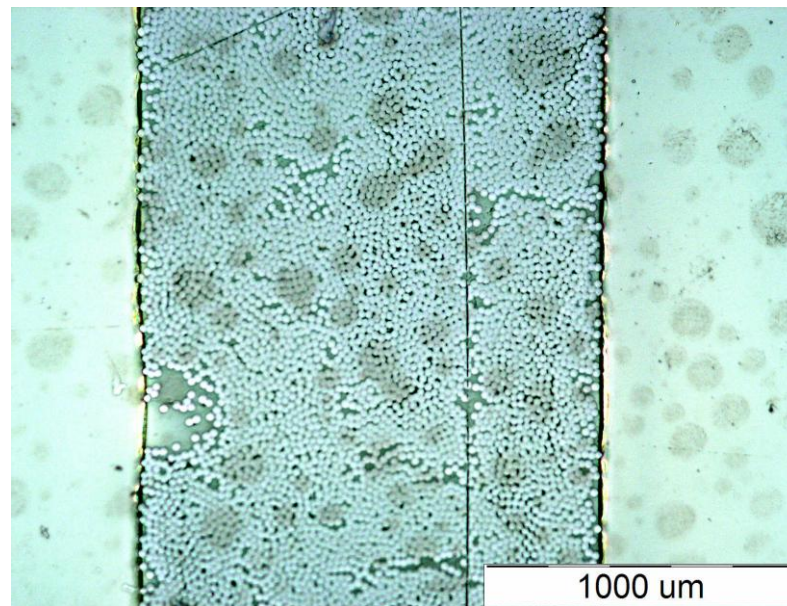
* A préselt lapokból két, illetve egy darab készült
8. táblázat: A préselt lapok átlagos száltartalma

5.1. Optikai mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp

A mikroszkópi képeken jól látszik, hogy mind a PP, mind pedig a PET esetében megfelelő a préselt lapok konszolidáltsága. Az UD mintáknál, amelyek a 27. és 28. ábrán láthatók, nem figyelhetők meg elkülönülő rétegek, vagyis a kompozit kellően homogén. A PP lapoknál néhol felismerhetők a szálkötegek, de nincsenek nagyobb összefüggő mátrix foltok a keresztmetszeten.

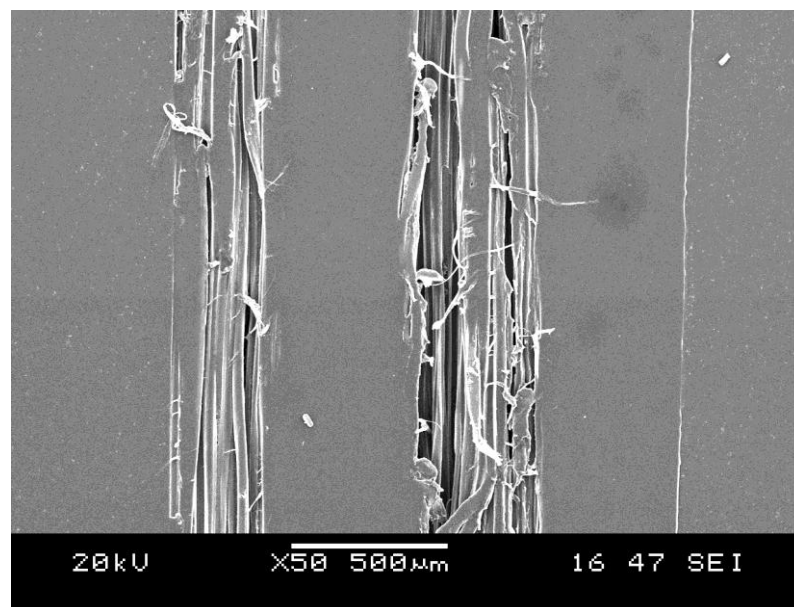


27. ábra: UD PP optikai mikroszkópi képe

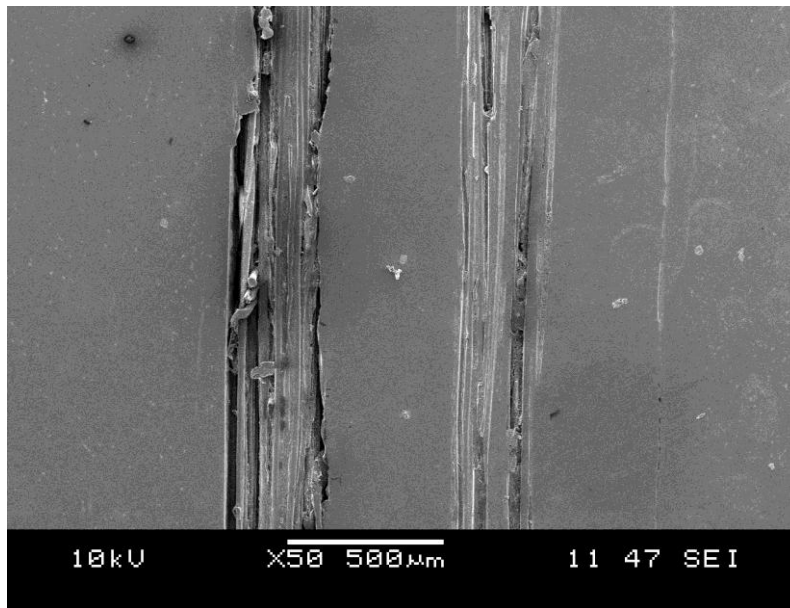


28. ábra: UD PET optikai mikroszkópi képe

A CP rendszereknél, amelyeket a 29. és 30. ábra mutat, jól elkülöníthetők a 0 és 90°-os rétegek mindkét alapanyag esetében. Az elektronmikroszkópi képeken megfigyelhetők a szálak közt mátrix által ki nem töltött üregek, viszont a legtöbb helyen jó a konszolidáltság.

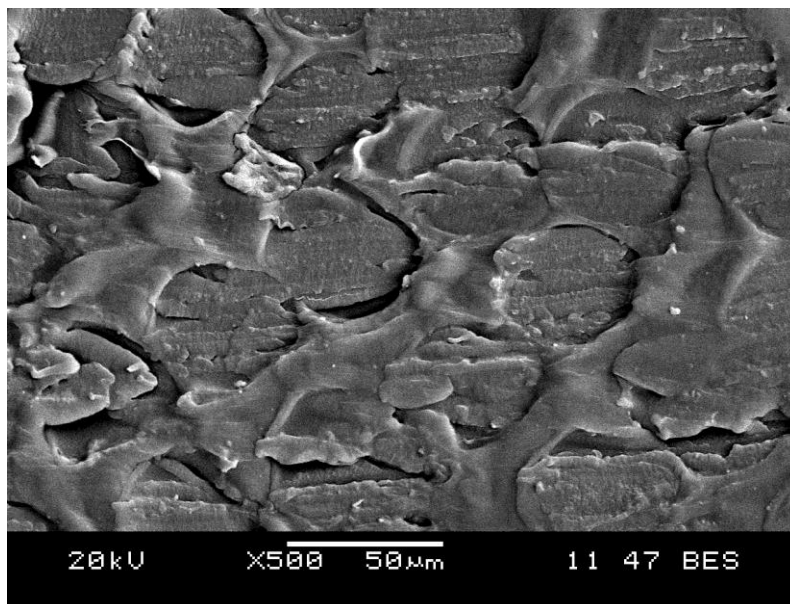


29. ábra: CP PP elektronmikroszkópi képe

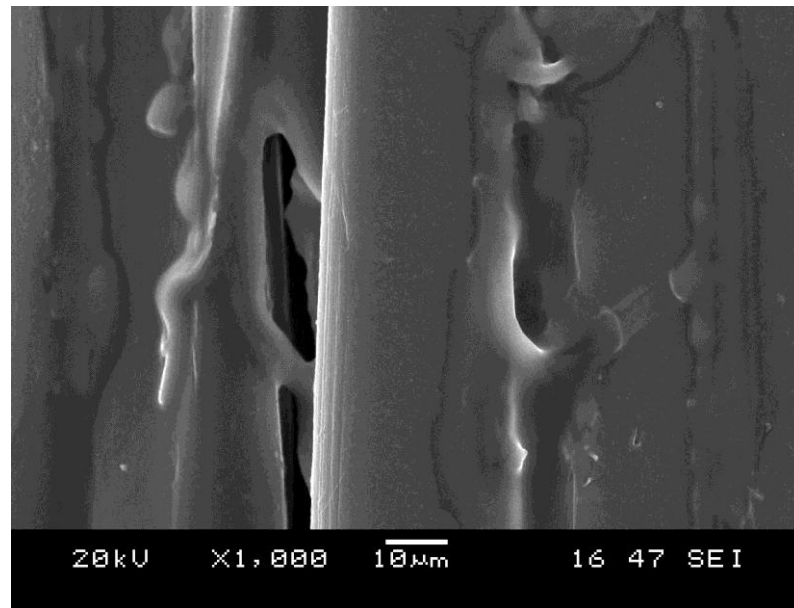


30. ábra: CP PET elektronmikroszkópi képe

Ahogy a 31. ábrán látható, a mátrix többségében teljesen körbe tudta venni a szálakat, így létre tudott jönni a megfelelő szál-mátrix kapcsolat. A 32. ábra az önerősített kompozitokra jellemző kiváló adhéziót szemlélteti. Megfigyelhető, hogy a mátrixanyag jól nedvesíti az azonos anyagcsaládba tartozó erősítőanyagot.



31. ábra: Jól konszolidált PP szálak elektronmikroszkópos keresztmetszeti képe



32. ábra: Szál-mátrix kapcsolódás elektronmikroszkópi képe

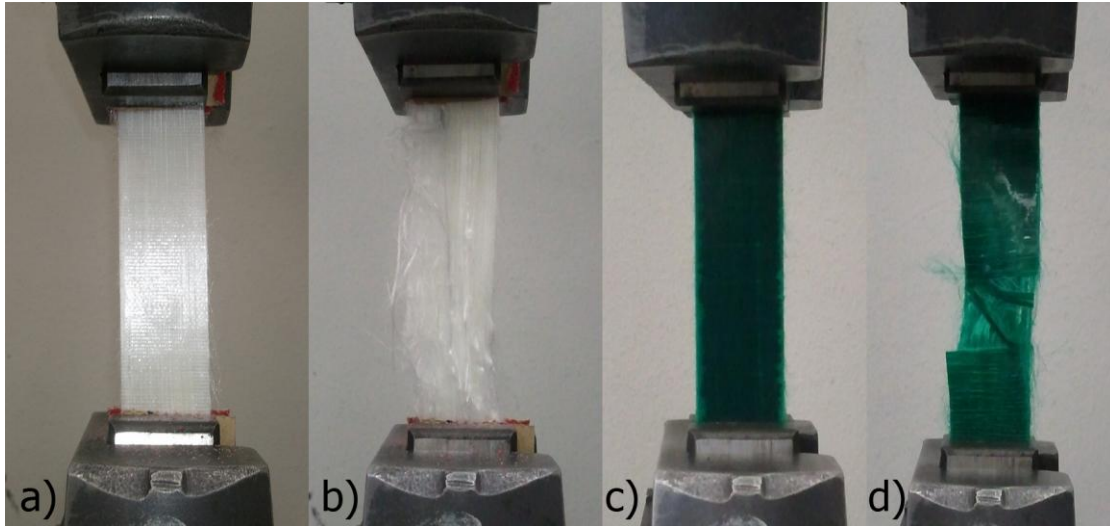
5.2. Szakítóvizsgálat

A préselt lapok szakítóvizsgálatából számított eredményeket a 1. táblázat tartalmazza összevetve a mátrixanyagok adatlapján megadott értékekkel. Az tapasztaltuk, hogy PP esetében az erősítetlen anyag húzószilárdságához képest UD PP-nél közel 1000 %-os, amíg CP PP-nél több mint 600 %-os erősítést sikerült elérni. Az UD PET meghaladta a 900 %-os, a CP PET pedig a 600 %-os erősítést saját mátrixanyagához képest.

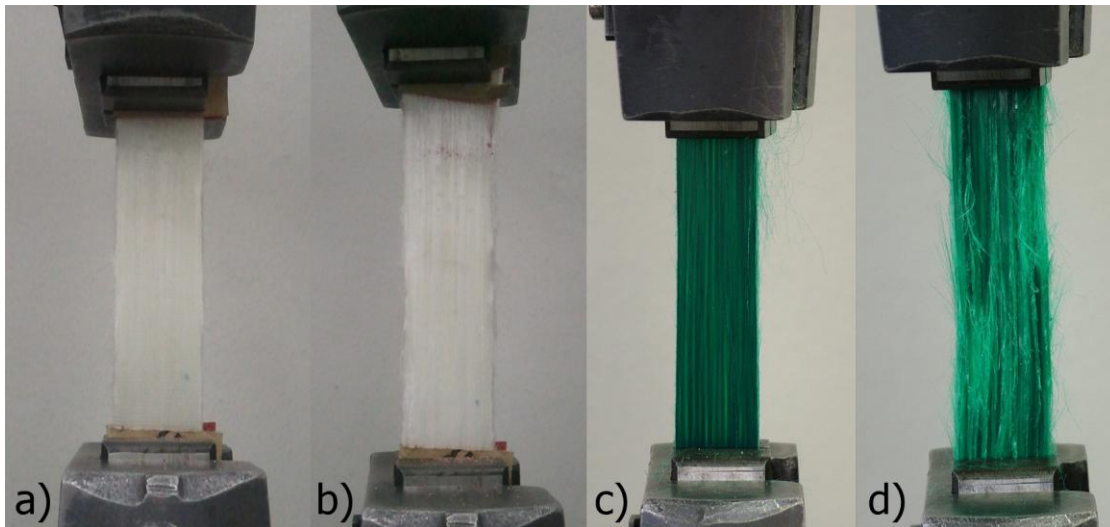
	R 959 A	PP/UD	PP/CP	6763 PETG	PET/UD	PET/CP
Húzószilárdság [MPa]	27,5	274,4±10,3	165,1±10,4	50,0	458,6±29,0	301,7±9,9
Rugalmassági modulus [MPa]	950	3063±313	1700±107	2100	5528±399	2943±345
Nyúlás [%]	13,0	29,7±2,3	23,8 ±1,7	4,0	15,0±0,5	15,7±1,1

9. táblázat: A préselt lapok szakítóvizsgálatának eredményei

A 33. ábrán a kétféle anyagból kimunkált CP próbatestek láthatóak a szakítóvizsgálat előtt, és a tönkremenetel után. A 34. ábra az UD-s lapok szakítását szemléltetik.

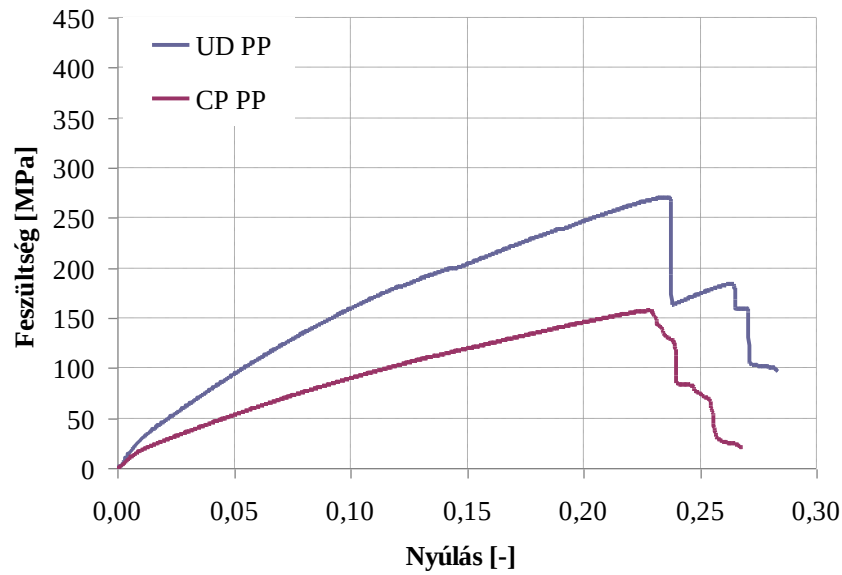


**33. ábra: Szakítóvizsgálat a) CP PET szakítás előtt; b) CP PET szakítás után;
c) CP PP szakítás előtt; d) CP PP szakítás után**

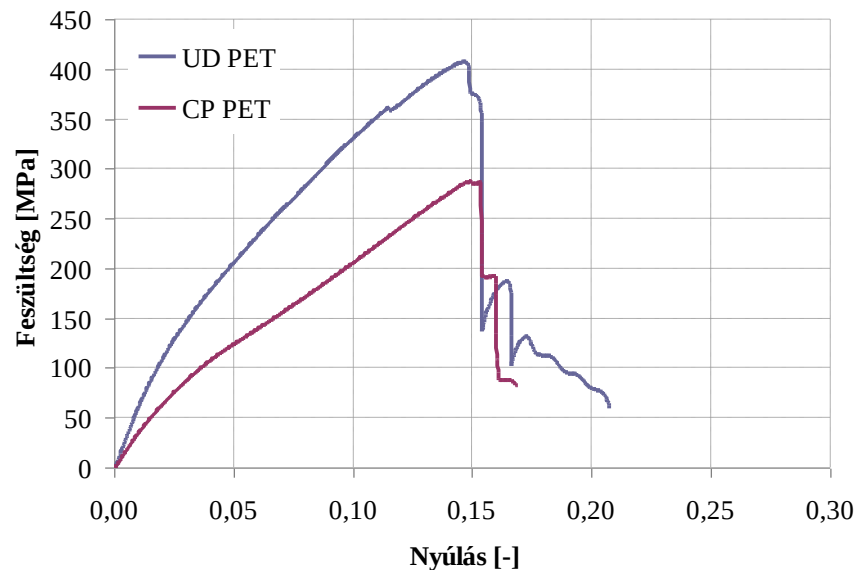


**34. ábra: Szakítóvizsgálat a) UD PET szakítás előtt; b) UD PET szakítás után;
c) UD PP szakítás előtt; d) UD PP szakítás után**

A 35. és 36. ábrák a PP és PET próbatestekre jellemző szakítógörbét mutatnak. Jól látható, hogy a CP rétegrendű kompozit lapok húzószilárdsága nem éri el az UD rendszerek eredményeit. Ennek az oka, hogy a CP elrendezésben a 4 erősítő rétegből csak kettő terhelés irányú. A görbék lefutásán nyomon követhető a szálkötegek tönkremeneteléből adódó feszültség ingadozások, vagyis a szálerősítés megvalósul.

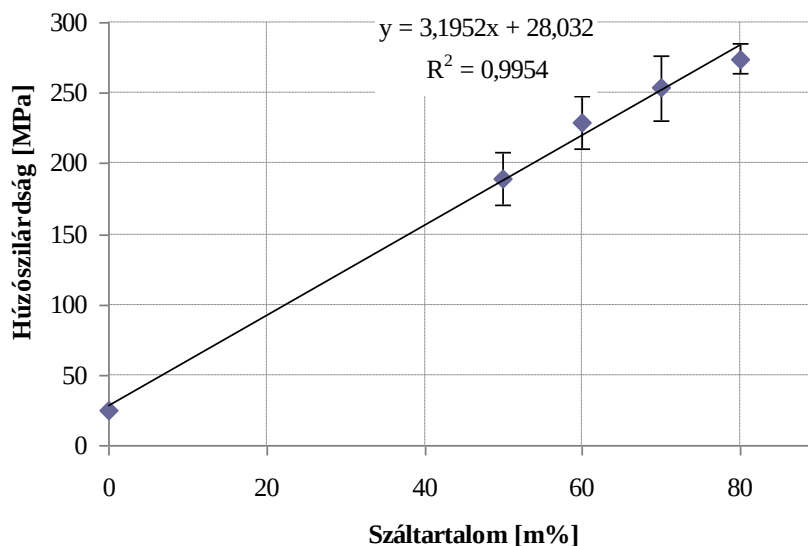


35. ábra: A PP próbatetek jellegzetes szakítógörbéi

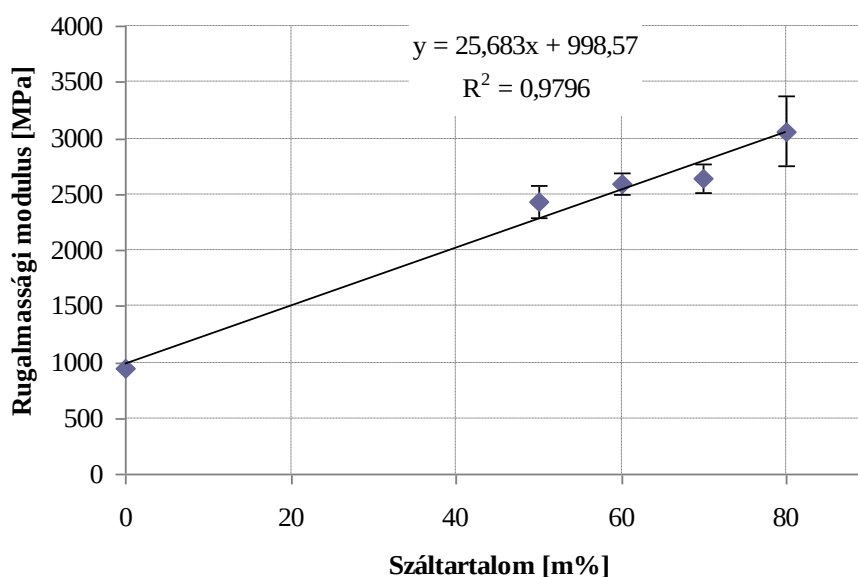


36. ábra: A PET próbatetek jellegzetes szakítógörbéi

Az egyirányban erősített PP kompozit lap szakítóvizsgálatának kiértékelése külön figyelmet kapott, mivel a korábbi szakdolgozat ezen témakört dolgozta fel, csak más száltartalmakat vizsgált. Az akkori vizsgálatok az 50, 60 és 70 tömeg%-os UD PP lapok gyártására koncentrált, ezek húzószilárdsági és rugalmassági modulusz értékeit rendezte táblázatba [31]. Ezen eredmények mellé, egyfajta kiegészítésként a 80 tömeg%-os lapnál általunk mért értékek lettek ábrázolva 37. és 38. ábrán.



37. ábra: Különböző száltartalmú lapok húzószilárdsági értékei

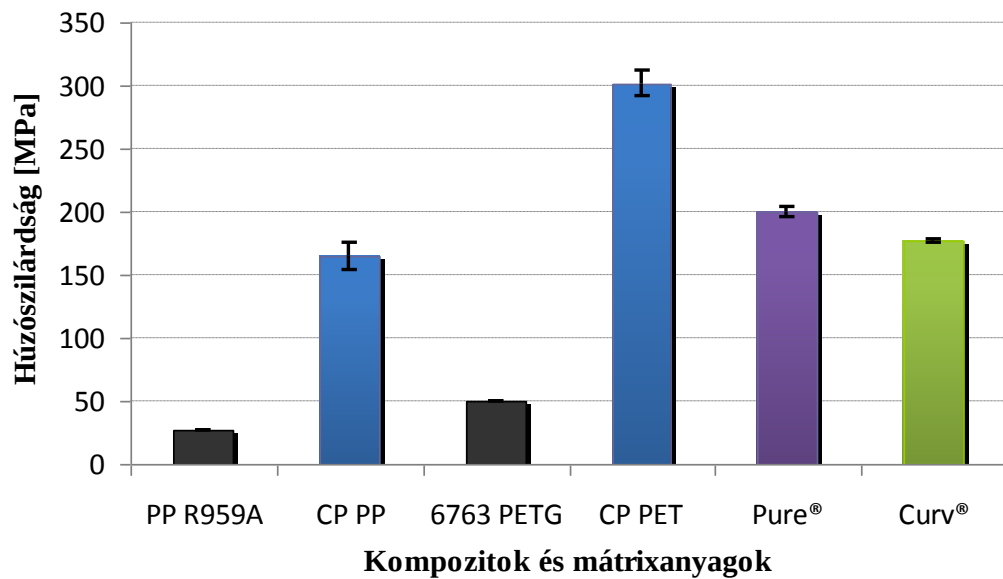


38. ábra: Különböző száltartalmú lapok rugalmassági modulusz értékei

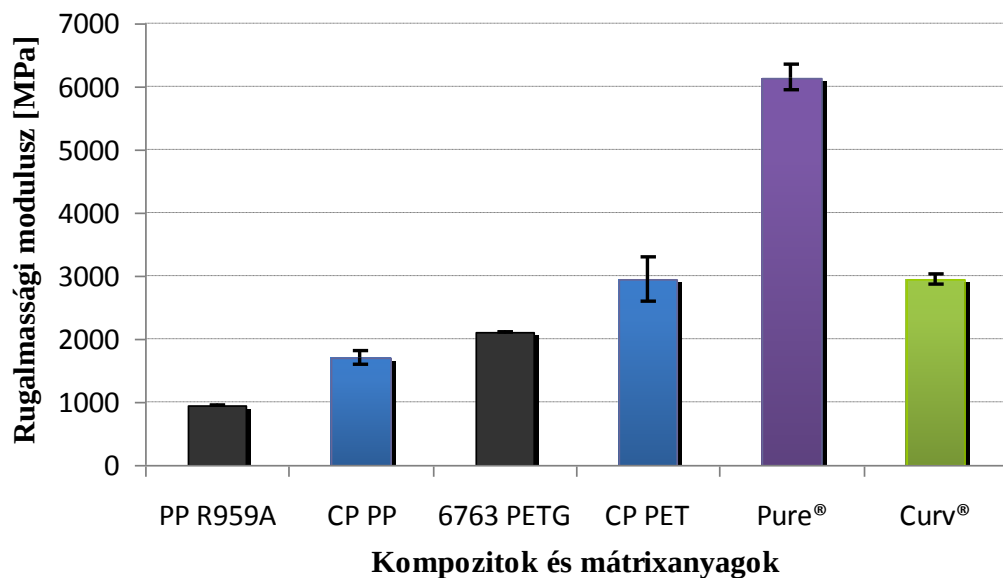
A húzószilárdság és a rugalmassági modulusz esetében is megfigyelhető, hogy a száltartalom növekedésével arányosan nőnek a kapott értékek, amelyet az általunk mért érték is alátámaszt. Ennek ismeretében természetes, hogy a mátrixanyag tulajdonságain is messze túlmutat a kompozit lap, az erősítés kétségtelen.

Az általunk készített CP erősítésű kompozit lemezek mechanikai tulajdonságaira kiterjedő vizsgálat azt célozta meg, hogy összehasonlíthassuk őket a kereskedelemben is kapható önerősítéses kompozitokkal, amit a 39. és 40. ábra tartalmaz. Az említett kompozitok, amelyek Pure[®] és Curv[®] márkaneven kerülnek forgalomba,

laborkörülmények között korábban vizsgálatra kerültek, amely mérés eredményeit felhasználtam az ábra készítéséhez [34].



39. ábra: A különböző típusú kompozitok húzószilárdságának összehasonlítása



40. ábra: A különböző típusú kompozitok rugalmassági moduluszának összehasonlítása

Az összehasonlító oszlopdiagram tartalmazza a PP és PET mátrixanyagok gyártójuk által közölt szilárdsági értékeit is, így segítve az ábra értelmezését. Az általunk előállított CP PP kompozittal sikerült megközelítenünk a Curv® húzószilárdsági értékeit, viszont a rugalmassági moduluszt tekintve elmaradtunk attól, amely még szembetűnőbb a Pure®-el összehasonlítva. Ez a nagy különbség az előállítási technológiák eltéréséből adódik. A CP PET kompozitot tekintve látható, hogy sokkal jobb húzószilárdsági értéket

produkált, mint a kereskedelmi termékek. Rugalmassági modulusza pedig a Curv[®] értékével egyezik meg.

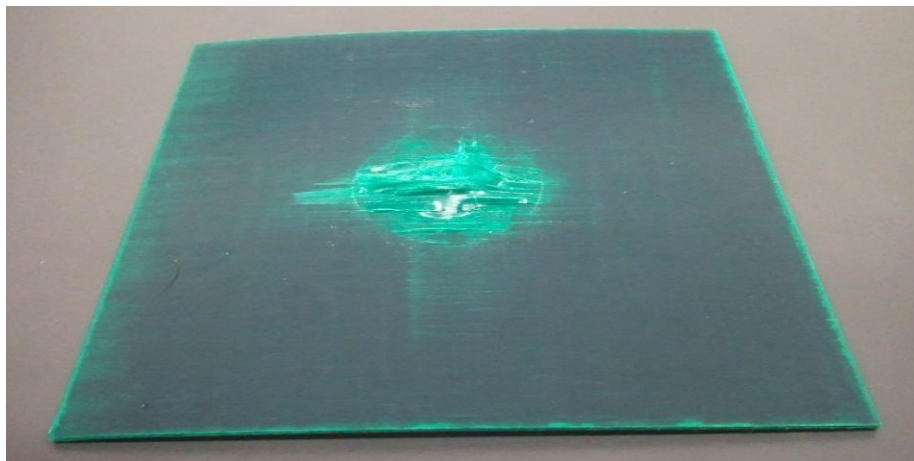
5.3. Ejtődárdás vizsgálat

Az ejtődárdás mérés során a CP erősítésű kompozitokat vizsgáltuk meg, mivel UD erősítés esetén az egyirányban álló szálak szétcsúszása miatt nem célszerű vizsgálatot folytatni. A szabvány szerint 80x80 mm-es próbatesteket használtunk. Azonban az előkísérletek során az ekkora próbatestek tönkretétele – ezzel értékelhető mérési eredményhez jutás – sikertelen volt, mert a próbatest nem szakadt át, vagy valójában szakadás helyett száلكihúzódnást láthattunk, amit a piros nyíl mutat a 41. ábrán.



41. ábra: Szabványos próbatest ejtődárdás vizsgálat után

Annak ellenére, hogy a próbatestet lezorító lappal szorítottuk le a próbatestet 5 bar nyomás alkalmazásával, nem jártunk sikerrel. Mivel rendelkezésünkre álltak további kompozit lapok, ezért a szabványtól eltérő, 145x145 mm méretű lapokat vágunk ki. Abban bízunk, hogy így elkerülhető a száلكihúzódnás és az elvárt tönkremeneteli formát kapjuk vizsgálat során. Ezen törekvéseink sikeresnek bizonyultak, a megnövelt méretű próbatestek az előzőekkel azonos gépi beállítások mellett kapott mennyiségek kiértékelhetőek voltak. A vizsgálat utáni próbatestet a 42. ábra mutatja. A perforációs energia $E_p=33,0\pm12$ J/mm-re adódott.



42. ábra: Jól konszolidált CP PP próbatest ejtődárdás vizsgálat után

A CP PET próbatestek vizsgálatára áttérve azonban hasonló problémába ütköztünk, pedig ebben az esetben is a növelt, 145x145 mm-es méretet alkalmaztuk (43. Elmondható tehát, hogy ezekkel a paraméterekkel nem lehetett vizsgálni a CP PET kompozit lapot.



43. ábra: CP PET próbatest ejtődárdás vizsgálat után

Fröccsöntött próbatestek vizsgálata

A fröccsöntött lapkákon és a belőlük kimunkált próbatesteken szakító- és zsugorodás vizsgálatot végeztünk.

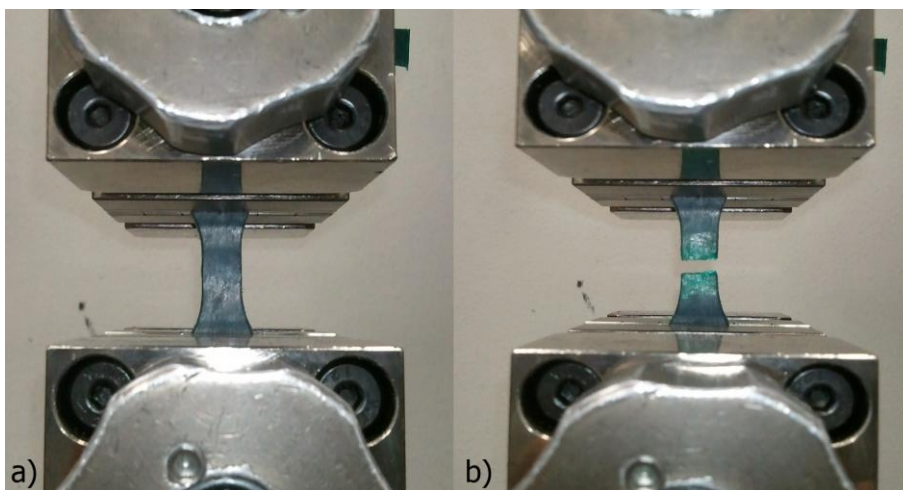
5.4. Szakítóvizsgálat

A kitöltési kép alapján különböző helyekről kivágott piskóta próbatestek szakítóvizsgálatának eredményeit a 10. táblázat mutatja. A folyásirányban kimunkált daraboknál a szélső próbatestek mechanikai tulajdonságai bizonyultak jobbnak, ami annak köszönhető, hogy a lapka szélén állnak a szálak leginkább terhelési irányban. Keresztirányú esetben azért kisebbek a számított értékek, mert a piskóta próbatest középső része, vagyis a tönkremenetel helye minden esetben a lapka közepére esik, ahol a folyásirányú adatok sem érik el a széleken mért értékeket.

	Folyásirány bal	Folyásirány közép	Folyásirány jobb	Keresztirány bal	Keresztirány közép	Keresztirány jobb
Húzószilárdság [MPa]	31,0±4,7	27,5±3	34,9±3	29,1±4,9	28,2±3,9	30,4±2,6
Rugalmassági modulus [MPa]	1544,9±70	1479,6±55	1567,0±153	1426,1±53	1438,8±67	1443,9±53
Nyúlás [%]	8,5±3	7,2±1,6	12,5±5,7	11,5±9,5	15,4±12,8	11,6±6,5

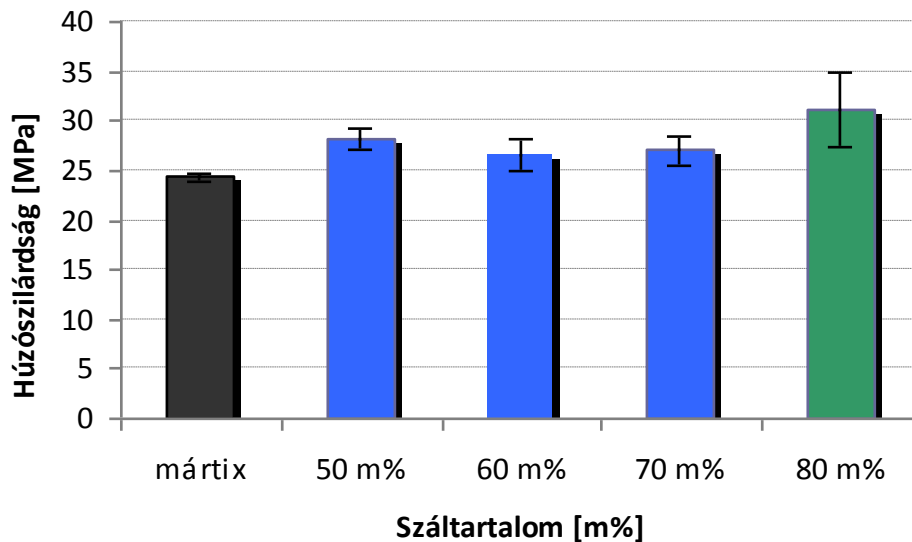
10. táblázat: Fröccsöntött próbatestek szakítóvizsgálatának eredményei

A 44. ábra a piskóta próbatest szakítóvizsgálathoz való befogását és a tönkremenetelét szemlélteti.

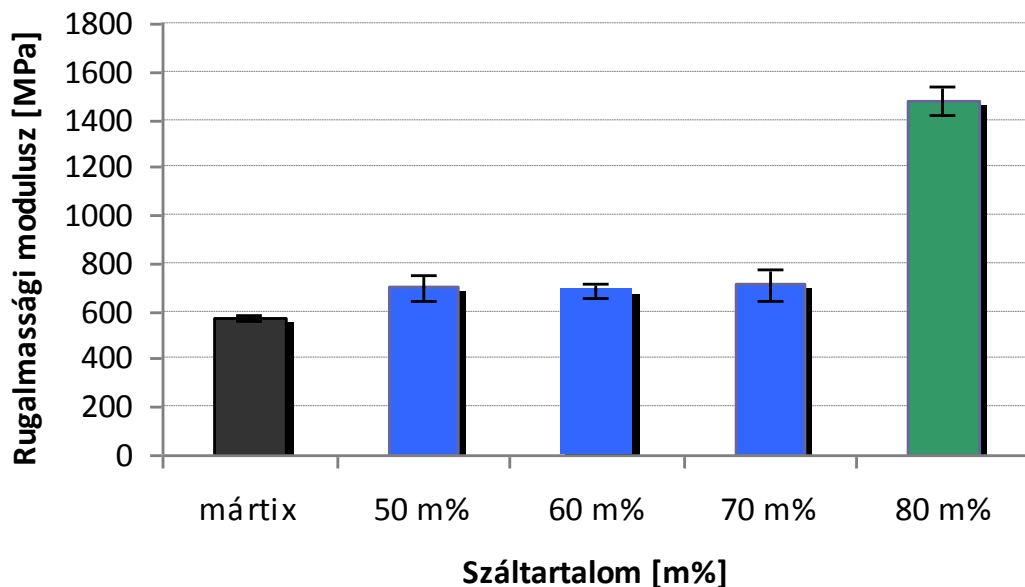


44. ábra: Szakítóvizsgálat a piskóta próbatesten a) szakítás előtt; b) szakítás után

A fröccsöntött próbatestek mechanikai tulajdonságai nem csak az erősítetlen mátrixhoz képest, hanem a korábbi szakdolgozatban vizsgált kompozitokhoz hasonlítva is kiemelkedőek. A 45. és 46. ábra szemlélteti, hogy a húzószilárdság esetében ~130%-ot értünk el, a rugalmassági modulusznál pedig 160%-os a növekedés a mátrixszal összevetve. A diagramokon megfigyelhető a száltartalom növelésével a mechanikai tulajdonságok kedvezőbbek lesznek.



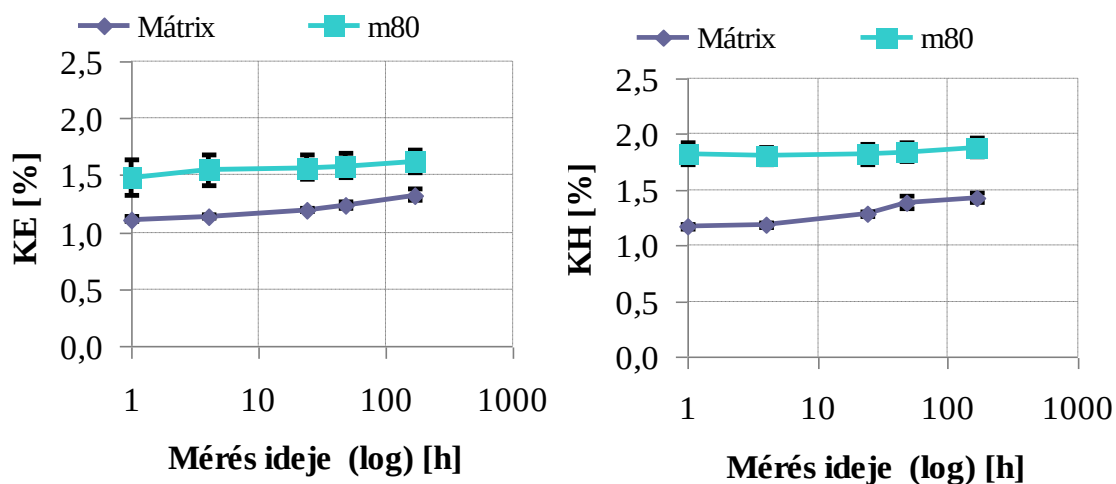
45. ábra: Húzószilárdság különböző száltartalmaknál piskóta próbatest esetén



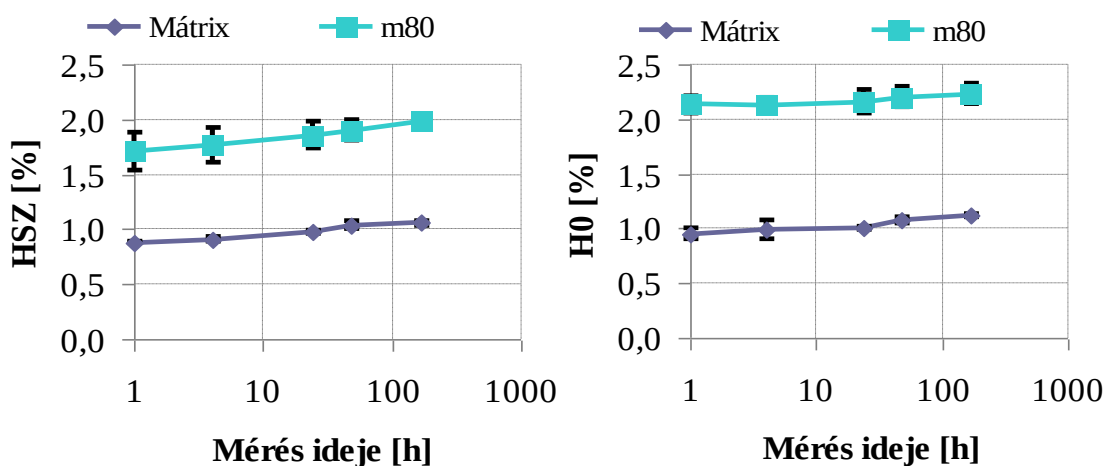
46. ábra: Rugalmassági modulusz különböző száltartalmaknál piskóta próbatest esetén

5.5. Zsugorodás vizsgálat

A fröccsöntött próbatestek meghatározott helyein mért adatokból látható, hogy a szálerősített kompozit viselkedése eltér a mátrixétól. A vizsgált darabok zsugorodása százalékosan nagyobb, mint az erősítetlen PP-é, viszont a térfogatváltozás időben egyenletesebb. A mátrixanyag zsugorodása a fröccsöntéstől számított 48 és 168 óra közötti időszakban nagyobb volt, ami a kompozitra nem jellemző. A szálak próbatesten belüli orientációja miatt a keresztirányú szélességváltozása, és az erősítetlen anyaghoz képesti zsugorodása is kisebb, mint hosszanti irányban. A hőre lágyuló erősítőanyag viselkedése térfogatváltozás szempontjából nem hasonlítható össze a kisebb hőtágulású és merevebb szervesetlen szálakéval. A fröccsöntött próbatestek zsugorodását az idő függvényében a 47. ábra és 48. ábra mutatja.



47. ábra: Zsugorodás mértéke az idő függvényében KE (balra) és KH (jobbra) helyen



48. ábra: Zsugorodás mértéke az idő függvényében HSZ (balra) és H0 (jobbra) helyen

6. Összefoglalás

TDK dolgozatunk során célul tűztük ki, hogy nagy száltartalmú (~80 tömeg%), jó mechanikai tulajdonságú, önerősítéses kompozit lapokat állítsunk elő, PP illetve PET anyagból, amelyeket mechanikai és morfológiai szempontból vizsgáltuk. Annak megállapítására, hogy a kompozit erősítő hatása mérhető volt-e, az alapanyagokra vonatkozóan egy korábbi szakdolgozat illetve a tanszéken született korábbi eredményeket tekintettük mérvadónak.

A kompozit lapok előállításának alapjául szolgáló gyártástechnológiának a tekercseléses és préseléses eljárást választottuk. Ennek során két alapanyagot, a PP-t, illetve PET-et alkalmaztunk, anyagonként kétféle erősítést előállítva: egyirányban erősített (UD) és keresztirányban erősített (CP) struktúrát. A gyártott kompozit jó mechanikai tulajdonságait csak úgy lehet garantálni, ha a préselés során elért konszolidáció, vagyis az erősítőanyag mátrixanyaggal való átítatottsága kiváló. Ennek elérésében a préselés során alkalmazott hőmérséklet és nyomás volt a döntő. Az előkísérletek során PP esetében 180°C és 5,26 MPa, míg PET esetében 210°C és 5,26 MPa adódott optimális értékek.

Az UD PP kompozittal végzett kísérletek tekinthetők egy korábbi szakdolgozat folytatásának is, ahol 50, 60, 70 tömeg%-os préselt lapok tulajdonságai kerültek meghatározásra, ami jelen dolgozat eredményeivel kiegészülve lehetőséget adott arra, hogy a préseléses technológia és az alkalmazott anyag esetén következtetést vonjunk le a száltartalom hatására vonatkozóan. Kimutattuk, hogy a húzószilárdsági és a rugalmassági modulusz értékek arányosan növekednek a száltartalommal. Az említett UD PP kompozit egyben a fröccsöntési kísérlet előgyártmányaként is szolgált, amelynek eredményei szintén illeszthetők voltak a korábban elvégzett mérésekhez [31]. A fröccsöntéssel elért értékek elmaradtak a várakozásoktól, ennek lehetséges okait feltárva a későbbiekben újabb kísérletekkel próbálunk jobb eredményeket elérni.

A szakítóvizsgálatokon túl a konszolidáció vizsgálata elektron-, valamint optikai mikroszkóppal is megtörtént. A felvételekből megállapítottuk, hogy az erősítőanyag és mátrixanyag kiválóan kapcsolódik egymáshoz.. A mérési eredmények tükrében kijelenthető, hogy az erősítés nagymértékben javította a kompozit mechanikai tulajdonságait. CP PET és CP PP esetében is azt tapasztaltuk, hogy a húzószilárdság a mátrixhoz képest 600 %-kal nagyobbra adódott. UD PET esetében több, mint 900%, míg UD PP esetében közel 1000% erősítés volt mérhető a mátrixanyag húzószilárdságához képest.

A CP erősítéssel ellátott PP és PET kompozitok mechanikai tulajdonságainak meghatározása során hangsúlyt fektettünk arra, hogy a kereskedelemben kapható önerősítéssel kompozit lemezekkel (Pure[®], Curv[®]) összehasonlítsuk húzószilárdság és rugalmassági modulusz szempontjából. Kimutattuk, hogy az általunk előállított PP kompozit lemez húzószilárdsági értékeivel sikerült Curv[®]-ot megközelíteni, míg PET esetében még a jobb húzószilárdsági értéket produkált Pure[®]-t is sikerült túlszárnyalni. Ezzel sikerült alátámasztani, hogy a munkánk során alkalmazott technológia segítségével jó mechanikai tulajdonságú és jól konszolidált kompozit lapokat sikerült előállítanunk, kereskedelemben kapható és alacsony árú alapanyagokat felhasználva.

7. További megoldásra váró feladatok

További megoldásra váró feladatok közé soroljuk az előimpregnált granulátum fröccsöntésekor beállított paraméterek és alkalmazott szerszámkialakítás (gát) hatásának vizsgálatát a fröccsöntött önerősítéses kompozitra nézve. Továbbá a préselt PP illetve PET kompozit lapok rétegekőzi és tőnkremeneteli módjának vizsgálatát.

8. Irodalomjegyzék

1. Directive 2000/53/EC of European Parliament and of the Council of 18 September 2000
2. Cvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
3. Czigány T., Izer A., Tábi T.: Polimer kompozitok-áttekintés. Műanyag és Gumi, 44, 185-191 (2007).
4. Kmetty A., Barany T., Karger-Kocsis J.: Self-reinforced polymeric materials: A review. Progress in Polymer Science, 35, 1288-1310 (2010).
5. Izer A., Kmetty Á., Bárány T.: Környezetbarát önerősítéses polimer kompozitok. Műanyag és Gumi, 45, 463-467 (2008).
6. Ward I. M., Hine P. J.: Novel composites by hot compaction of fibers. Polymer Engineering and Science, 37, 1809-1814 (1997).
7. Hine P. J., Ward I. M.: High stiffness and high impact strength polymer composites by hot compaction of oriented fibers and tapes, in Mechanical Properties of Polymers based on Nanostructure and Morphology. in 'Mechanical properties of polymers based on nanostructure and morphology' (eds.: F. J. Baltá-Calleja and G. H. Michler) CRC Press, Boca Raton, Vol 677-698 (2005)
8. Hine P. J., Ward I. M., Teckoe J.: The hot compaction of woven polypropylene tapes. Journal of Materials Science, 33, 2725-2733 (1998).
9. Hine P. J., Ward I. M., Jordan N. D., Olley R., Bassett D. C.: The hot compaction behaviour of woven oriented polypropylene fibres and tapes. I. Mechanical properties. Polymer, 44, 1117-1131 (2003).
10. Hine P. J., Ward I. M., Jordan N. D., Olley R. H., Bassett D. C.: A comparison of the hot-compaction behavior of oriented, high-modulus, polyethylene fibers and tapes. Journal of Macromolecular Science-Physics, B40, 959-989 (2001).
11. Ward I. M.: Developments in oriented polymers, 1970-2004. Plastics Rubber and Composites, 33, 189-194 (2004).
12. Ward I. M., Hine P. J.: The science and technology of hot compaction. Polymer, 45, 1413-1427 (2004).
13. Abraham T. N., Wanjale S. D., Bárány T., Karger-Kocsis J.: Tensile mechanical and perforation impact behavior of all-PP composites containing random PP copolymer as matrix and stretched PP homopolymer as reinforcement: Effect of [beta] nucleation of the matrix. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 662-668 (2009).
14. Alcock B., Cabrera N. O., Barkoula N. M., Loos J., Peijs T.: Interfacial properties of highly oriented coextruded polypropylene tapes for the creation of recyclable all-polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, 104, 118-129 (2007).
15. Abraham T. N., Siengchin S., Karger-Kocsis J.: Dynamic mechanical thermal analysis of all-PP composites based on beta and alpha polymorphic forms. Journal of Materials Science 43, 3697-3703 (2008).
16. Abraham T., Banik K., Karger-Kocsis J.: All-PP composites (PURE (R)) with unidirectional and cross-ply lay-ups: dynamic mechanical thermal analysis. Express Polymer Letters, 1, 519-526 (2007).
17. Houshyar S., Shanks R. A.: Morphology, thermal and mechanical properties of poly(propylene) fibre-matrix composites. Macromolecular Materials and Engineering, 288, 599-606 (2003).

18. Houshyar S., Shanks R. A.: Tensile properties and creep response of polypropylene fibre composites with variation of fibre diameter. *Polymer International*, 53, 1752-1759 (2004).
19. Houshyar S., Shanks R. A.: Mechanical and thermal properties of toughened polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 105, 390-397 (2007).
20. Houshyar S., Shanks R. A.: Mechanical and thermal properties of flexible poly(propylene) composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291, 59-67 (2006).
21. Houshyar S., Shanks R. A., Hodzic A.: Modelling of polypropylene fibre-matrix composites using finite element analysis. *Express Polymer Letters*, 3, 2-12 (2009).
22. BA!rA!ny T., Karger-Kocsis J., CzigA!ny T.: Development and characterization of self-reinforced poly(propylene) composites: carded mat reinforcement. *Polymers for Advanced Technologies*, 17, 818-824 (2006).
23. BA!rA!ny T., Izer A., Karger-Kocsis J.: Impact resistance of all-polypropylene composites composed of alpha and beta modifications. *Polymer Testing*, 28, 176-182 (2009).
24. BA!rA!ny T., Izer A., CzigA!ny T.: High performance self-reinforced polypropylene composites. *Materials Science Forum*, 567-538, 121-128 (2007).
25. Izer A., Bárány T., Varga J.: Development of woven fabric reinforced all-polypropylene composites with beta nucleated homo- and copolymer matrices. *Composites Science and Technology*, 69, 2185-2192 (2009).
26. Izer A., Bárány T.: Hot consolidated all-PP composites from textile fabrics composed of isotactic PP filaments with different degrees of orientation. *Express Polymer Letters*, 1, 790-796 (2007).
27. Zhang J. M., Peijs T.: Self-reinforced poly(ethylene terephthalate) composites by hot consolidation of Bi-component PET yarns. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 41, 964-972 (2010).
28. Kmetty Á.: Fröccsöntéssel gyártható környezetbarát, önerősítéses polimer kompozitok kifejlesztése. Diplomamunka BME Polimertechnika Tanszék, (2008).
29. Halász I. Z.: Újfajta, fröccsöntéssel feldolgozható önerősítéses kompozit előgyártmány fejlesztése. Szakdolgozat BME Polimertechnika tanszék, (2010).
30. www.tvk.hu: (2011).
31. László Z.: Fröccsöntéssel feldolgozható önerősítéses kompozit előgyártmány szál tartalmának hatása a gyártott kompozit mechanikai tulajdonságaira. Szakdolgozat BME Polimertechnika Tanszék, (2011).
32. <http://www.eastman.com/Pages/Home.aspx>: (2011).
33. Pataki L.: Nagyteljesítményű műszaki műanyagok alkalmazhatóságának vizsgálata önerősített polimer kompozitokra vonatkozóan. Diplomamunka BME Polimertechnika Tanszék, (2009).
34. Bárány T., Izer A., Czigány T.: A konszolidáltság mértékének hatása az önerősítéses kompozitok mechanikai tulajdonságaira. *Anyagvizsgálók Lapja*, 4, 113-115 (2005).

9. Melléklet

Minta neve	Anyag	Erősítés iránya	Mátrix tömeg [g]	Szál tömeg [g]	Nettó tömeg [g]	Száltartalom [%]
Zs2	PP	UD	40	155	195	79
M1	PP	UD	40	160	200	80
M2	PP	UD	40	151	191	79
M3	PP	UD	40	145	185	78
M4	PP	UD	40	159	199	80
M5	PP	UD	40	151	191	79
M6	PP	UD	40	131	171	77
M9	PP	UD	40	147	182	81
M10	PP	UD	40	163	203	80
M11	PP	UD	40	153	193	79
M13	PP	UD	40	150	190	79
M14	PP	UD	40	161	201	80
M15	PP	UD	40	138	178	78
M7	PP	CP	40	263	303	87
M8	PP	CP	40	237	277	86
M12	PP	CP	40	235	275	85
M1-P	PET	UD	60	218	278	78
M2-P	PET	CP	60	231	291	79

1. /m táblázat: Préseléssel előállított kompozit lapok jellemző adatai