



Hibrid kompozitok: mechanikai tulajdonságok és deformációs mechanizmusok

TDK-dolgozat

Készítette:

Schäffer Ádám

Vegyésmérnöki alapképzési szak, BSc III. évfolyam

Témavezető:

Várdai Róbert tudományos segédmunkatárs,
BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék,
TTK AKI Polimerfizikai Kutatócsoport

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vegyésmérnöki és Biomérnöki Kar
Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék
Műanyag- és Gumiipari Laboratórium
Budapest, 2021

Lezárva: 2021. október

Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	3
2. Irodalmi összefoglaló.....	4
2.1. Polimer keverékek és kompozitok	4
2.2. Kompozitok tulajdonságait meghatározó tényezők	5
2.3. Töltőanyagok: általános jellemzés	7
2.4. Töltőanyagok: hatás a kompozitra	8
2.5. Szálak: általános jellemzés	9
2.6. Szálak: hatás a kompozitra.....	10
2.7. Mikromechanikai deformációs folyamatok	10
2.8. Ütésállóság	11
3. Kísérleti rész	12
3.1. Felhasznált anyagok.....	12
3.2. Mintakészítés	14
3.3. Mérési módszerek	16
4. Eredmények és értékelésük.....	17
4.1. Szakítóvizsgálat	17
4.2. Akusztikus emissziós vizsgálat.....	21
4.3. Törővizsgálat.....	23
4.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat.....	27
5. Összefoglalás	28
6. Köszönetnyilvánítás	29
7. Irodalomjegyzék	30

1. Bevezető

A kutatómunkám során szálerősítésű hibrid polipropilén kompozitokat készítettem a Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszéken. Az osztrák Borealis GmbH azzal a kéréssel kereste meg tanszékünket, hogy készítsünk olyan kompozit rendszereket, amelyek merevsége és ütésállósága is egyaránt kiemelkedően nagy annak érdekében, hogy azokat szerkezeti anyagként is alkalmazni lehessen. Korábbi tanszéki kutatások során sikerült olyan szálerősítésű hibrid kompozitokat létrehozni [1,2], amelyek teljesítik az ipar által támasztott követelményeket, tehát megfelelő tulajdonságkombinációval rendelkeznek. Az ipari elvárások polimerek szerkezeti anyagként való alkalmazásakor a 3 GPa-t meghaladó rugalmassági modulus és a 15-20 kJ/m²-nél nagyobb ütésállóság. Ezeket az értékeket a fejlesztés során talkum és poli(vinil-alkohol) szálak felhasználásával próbáltam elérni. Polipropilén kompozitokat szerkezeti anyagként, nagy mennyiségben használnak az autóiparban kedvező ára és jó tulajdonságai miatt [3]. A téma terület jelentőségét jól mutatja, hogy a korábbi tanszéki kutatási eredményekből szabadalom is született [4].

2. Irodalmi összefoglaló

A polipropilén (PP) napjaink egyik széles körben és legnagyobb mennyiségben felhasznált műanyaga, amelyet viszonylag olcsó árához képest nyújtott kiemelkedő tulajdonságaiért alkalmaznak. Kis sűrűségének, merevségének, jó szilárdságának és elfogadható ütésállóságának köszönhetően a PP felhasználása továbbra is nagy ütemben növekszik a többi tömegműanyaggal együtt. További előnye, a sokrétű módosíthatósága, elasztomerek hozzáadásával növelhető az ütésállósága, töltőanyagokkal és szálakkal a merevsége és szilárdsága. A polipropilénből nagyszámban gyártanak csomagolóanyagot, háztartási eszközöket és megfelelő módosításokkal az autópárhánban is használható akár szerkezeti elemként is [3,5-10].

2.1. Polimer keverékek és kompozitok

Különbséget teszünk polimer keverékek és kompozitok között. Míg keverékeket két vagy több polimer összekeverésével addig a kompozitokat töltőanyagok, vagy szálak hozzáadásával hozunk létre. Kompozitnak számít, ha a polimer mátrixba, polimer szálakat keverünk és a feldolgozás hőmérsékletén a szálak nem ömlenek meg. Abban az esetben, ha a szálak megömlenek már polimer keverékekről (blend) beszélhetünk. Önerősítésű kompozitok mátrixának és erősítőanyagának az alapanyaga megegyezik, így feldolgozás során a szál felülete megolvad vagy megömlik és együtt kristályosodik a mátrixszal, vagy fizikai térhálópontokat hoz létre [11].

A dolgozatomban címben szereplő hibrid kompozitok háromkomponensű heterogén rendszerek. Az elkészített kompozitok tartalmaztak a töltőanyag mellett szálakat is, ahol a töltőanyag által biztosított merevség mellett szeretnénk a szálak szilárdságnövelő és ütésállóság növelő tulajdonságait is kihasználni. Korábbi tanszéki fejlesztések keretében faliszt erősítőanyag mellett poli(etilén-tereftalát) szálakat használtak és végeredményül 15 kJ/m² ütésállóságot értek el [1].

2.2. Kompozitok tulajdonságait meghatározó tényezők

Kompozitkészítés során többkomponensű heterogén rendszerek jönnek létre, amelyek tulajdonságait négy tényező határozza meg: a komponensek jellemzői, az összetétel, a szerkezet és a határfelületi kölcsönhatások [12].

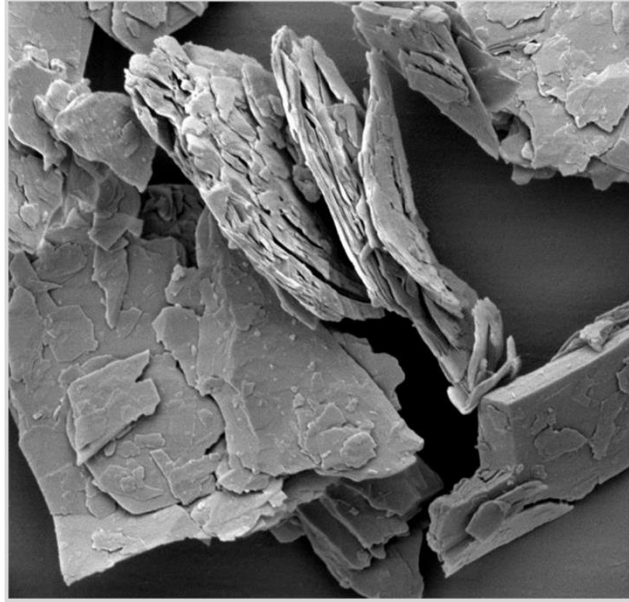
Komponensek tulajdonságai

Mátrix tulajdonságai

A mátrix tulajdonságai közül a legfontosabb annak a merevsége, mivel az határozza meg az erősítő hatás mértékét. Bourmaud és Pimbert vizsgálták ezt a hatást és arra a következtetésre jutottak, hogy a merevebb mátrixban nehezebb erősítő hatást elérni. Kísérletük során, 1,05 GPa modulusú polipropilén és 3,4 GPa modulusú politejsav mátrixból indultak ki. Azonos töltőanyag alkalmazása mellett (40 φ% faliszt), a kisebb modulusú mátrixban 250% relatív merevséget, míg a nagyobb modulusúban csak 200% relatív merevséget értek el [13].

Talkum tulajdonságai

A kutatómunka során felhasznált töltőanyag a talkum volt, mert számos kedvező tulajdonsággal bír. Nagy mennyiségben elérhető és ebből fakadóan az ára is alacsony, vetekszik a szerves természetes töltőanyagokéval. Nem lebomló, de ásványi eredetű, ami XXI. századi környezetvédelmi normáknak eleget tesz. Társítóanyagként alkalmazva sikerült 7,2 GPa nagyságú moduluszt elérni polipropilén mátrixban a fejlesztés alatt. Legnagyobb mennyiségben polipropilénben alkalmazzák, az abban kifejtett gócképző hatása miatt. A talkum egy lemezes szerkezetű (**1. ábra**), anizotróp másodlagos metamorf ásvány, amelynek kémiai összetétele $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$. A természetben megtalálható legpuhább ásvány, Mohs keménysége 1 [14]. Feldolgozás közben a lemezeket összetartó másodrendű kötések felbomlanak és az így keletkezett önálló lemezek nyírás hatására orientálódnak, ezúton fejtik ki erősítő hatásukat.



1. ábra *Talkum lemezes szerkezetéről készült SEM felvétel.*

PVA tulajdonságai

A poli(vinil-alkohol) egy vízzel oldható polimer, amit poli(vinil-acetát) hidrolízisével állítanak elő, főként papír készítéshez és textil felületkezeléséhez (sizing) használják. A PVA szálakat viszont betonban és habarcsban alkalmazzák főként, az ott kifejtett nagy erősítő hatásuk, valamint a repedések kialakulását és terjedését is gátló tulajdonságuk miatt. A PVA szálakat előszeretettel alkalmazzák azok viszonylag nagy rugalmassági modulusa és kiemelkedő szilárdsága miatt [15].

Összetétel

A kompozitok összetételére szinte végtelen sok variáció létezik, de általában egy, kettő vagy három társítóanyagot kevernek össze egyszerre. Egyes erősítőanyagok akár 30-50 m/m% -ban is jelen lehetnek a kompozitban (PP/üvegszál erősítés autókban), míg nano töltőanyagokból elég akár 2,5-5 m/m% is. A kompozitok egy bizonyos tulajdonságának javítása érdekében a hozzáadott nagyobb mennyiségű társítóanyag más tulajdonságok romlásához vezethet. Meg kell említeni, hogy nagymennyiségű erősítőanyag felhasználása feldolgozási problémákhoz és a készülék idő előtti amortizációjához vezethet.

Szerkezet

A kompozitok szerkezete nagymértékben függ a felhasznált töltőanyag mennyiségétől és annak felületi energiájától, valamint a kompozit létrehozásakor ható nyírási és áramlási viszonyoktól. A kisméretű szemcsék felületi energiája nagy, így inkább alakítanak ki kapcsolatot egymás között, mint a mátrixszal, és ez aggregációhoz vezet. Ezt a hatást csökkenteni lehet a szemcsék különböző típusú felületkezelésével. A nagy méretű szemcsék egy bizonyos összetétel felett összeérnek, így gyengítve a mechanikai tulajdonságokat. Aggregáció kialakulhat a feldolgozás során ható gyenge nyírási viszonyok miatt is. A fröccsöntéssel előállított próbatestek esetében mindig kialakul egy héj-mag szerkezet, aminek oka a szerszám hideg fala. A szerszámfal mentén az ömledék gyorsan lehűl, így az ottani molekulák és általuk körbefogott töltőanyagok folyásiránnyal párhuzamosan orientálódnak (héj). A szerszámtól távolabb, a termék belsejében a műanyag lassabban hűl le, a rossz hővezetési tulajdonságok miatt, és ennek köszönhetően a polimer molekulák relaxálódnak és elindulnak a gombolyodott alak felé míg a töltőanyagok random orientációt vesznek fel (mag).

Határfelületi kölcsönhatások

A kompozitok komponensei közt másodrendű, van der Waals kölcsönhatások jönnek létre, ezek felelősek az aggregáció és határfázis kialakulásáért. Aggregáció alakul ki, ha társítóanyag-társítóanyag kapcsolat jön létre mátrix-társítóanyag helyett. Ennek elkerülése érdekében, homogénebb eloszlásra van szükség, amely nagyobb nyírással vagy felületkezeléssel érhető el. Erősebb adhézió létrehozása érdekében elsőrendű kovalens kötésekkel kell létrehozni a mátrix és erősítőanyag között, így jobb feszültségátvitel érhető el. Ilyen kötésekkel kapcsolóanyagokkal lehet létrehozni, amelyekről a 2.6. pontban fogok beszélni.

2.3. Töltőanyagok: általános jellemzés

Töltőanyagokat először költségcsökkentés miatt alkalmaztak, de napjainkban ez már csak másodlagos feladatuk. Hozzáadásukkal sokféle, a különböző igényeknek megfelelő tulajdonságokat tudunk biztosítani termékünknek. Ilyen tulajdonságok lehetnek például a hővezetés, elektromos vezetés vagy az égésgátlás. Sajnos, hogy megfelelő hatást érjünk el, nagymennyiségben kell alkalmazni őket és ez a mechanikai tulajdonságok romlásához vezethet.

A töltőanyagok csoportosítása önkényes, leggyakrabban azok eredete szerint történik, lehet beszélni ásványi eredetű, természetes és mesterséges töltőanyagról. Felhasználásuk szempontjából fontos információ a szemcsék átlagos mérete, eloszlása, valamint azok alaki tényezője. A legnagyobb mennyiségben ásványi eredetű töltőanyagokat használnak fel. Mintegy 2000 féle található meg a természetben, de a felhasználás csak néhány fajtára korlátozódik. A legfontosabbak a kalcium-karbonát, talkum, kaolin, alumínium-hidroxid, szilícium-dioxid, Wollastonit. Az elmúlt években környezetvédelmi okokból egyre nagyobb szerepet kapnak a természetes töltőanyagok, mint a faliszt, lignin és keményítő. Előnyük, hogy nagy mennyiségben állnak rendelkezésre, megújulók és sokszor hulladékként keletkeznek, ezért áruk olcsó. Megfelelő körülmények között biológiailag lebomlanak, így a jövőben felhasználásuk várhatóan tovább fog nőni. Jó tulajdonságaik mellett azonban megtalálhatóak rosszak is, a természetes erősítőanyagot tartalmazó kompozitok ütésállósága kicsi. Várdai és társai ezt kísérelték meg javítani hibridizációval, poli(etilén-tereftalát) szálakat keverték különféle természetes töltőanyagot tartalmazó polipropilén kompozitokba [1].

Kis hőkapacitású töltőanyagok alkalmazásával a termék hőkapacitása is csökken. Ennek köszönhetően az ömledék hővezetőképessége nő, rövidebb ciklusidő érhető el, de a termék morfológiája is változik. Nagy különbségek, a mátrix és a társítóanyag termikus tulajdonságai között, termikus feszültségeket idéznek elő, melyek mikromechanikai deformációs folyamatokon keresztül hatással vannak a termék tönkremenetelére [7,16].

2.4. Töltőanyagok: hatás a kompozitra

A töltőanyag, kompozitra gyakorolt hatását előre nem lehet egyértelműen megmondani, számos tényező szerepet játszik a végtermék tulajdonságainak alakulásában. Fontos a töltőanyag kémiai összetétele és tisztasága, átmenetifém szennyeződések a polimer degradációját okozhatják, illetve az esetleges szennyeződések elszíneződést okozhatnak. A szennyeződések még hibahelyként is hathatnak, ahol a megnövelt feszültségkoncentráció miatt a repedések könnyebben iniciálódnak. A szemcsék mérete és eloszlása is befolyásolja a termék mechanikai tulajdonságait, nagyobb szemcsék drasztikusan csökkentik az ütésállóságot, a kisebbek pedig nagy hajlamot mutatnak az aggregációra. A kis és nagy szemcsék viselkedését a felületi energiával lehet magyarázni. A nagy szemcséké kisebb, így a szemcse-polimer kapcsolat gyengébb lesz, míg a

kisebbség felületi energiája nagy ezért ők könnyen kialakítanak egymás közt kapcsolatot. A nagyobb terhelés az aggregátumok szétesését eredményezi, így hibahely keletkezik. Hasonlóan fontos a szemcsék alakja, anizotrópiája. Az anizotrópia jellemzésére az alak tényezőt használják, ami a szemcse legnagyobb és legkisebb méretének hányadosa. Lemezes anyagok erősítő hatása nagyobb, mint a gömb alakúaké, mivel feldolgozás során a lemezek szétválnak és orientálódnak.

2.5. Szálak: általános jellemzés

Már az 1940-es években elkezdődött a szálerősítésű kompozitok fejlesztése az üvegszálerősítéses poliészter gyanták készítésével [17]. Az így készült anyag tulajdonságai meghaladták a fő szerkezeti anyagokét, így nagymértékű fejlődés következett a fegyverkezési versenynek köszönhetően, ahol a fejlesztés költsége nem számított.

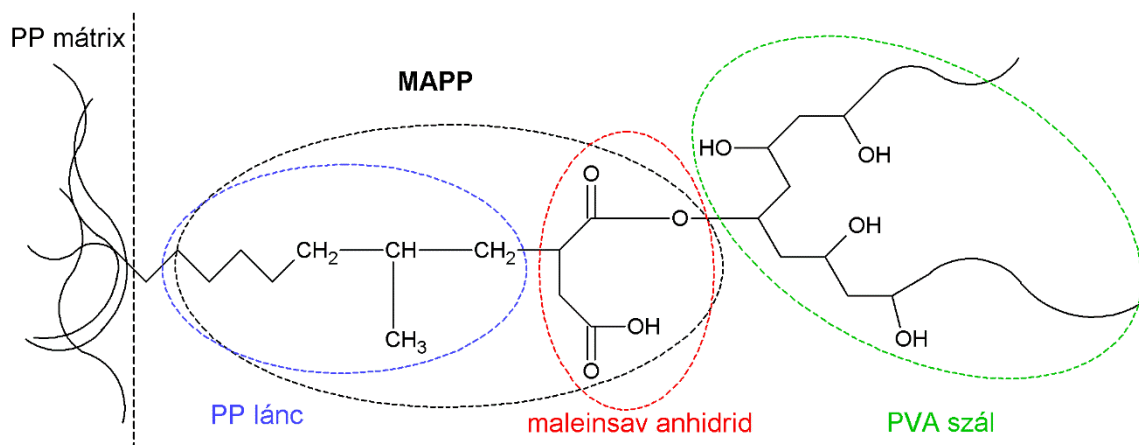
Azóta több különféle szál is használnak az iparban, ezeket két nagy csoportra szokás osztani: természetes és szintetikus szálakra. Szintetikus szálak közül megkülönböztetünk szerves és szervetlen szálakat. Szerves szálak közé tartozik például a polietilén, poli(etilén-tereftalát) és a poli(vinil-alkohol), szervetlen szálak közé sorolható a szén és üvegszál. A természetes szálak alcsoportjai az állati, cellulóz/növényi és ásványi eredetű szálak.

A szerves szálak viszonylag jó tulajdonságokkal rendelkeznek, nagy mennyiségben rendelkezésre állnak, sokszor mezőgazdasági termelés hulladékaként keletkeznek. Negatív tulajdonságukat a természetes töltőanyagokhoz lehet hasonlítani. A szálak nedvességre érzékenyek, hajlamosak nagy mennyiségű nedvességet megkötni, amely megnehezíti a feldolgozhatóságot. Ezen felül a felületi energiájuk alacsony, így a mátrixszal nem tudnak jó kölcsönhatást kialakítani.

Léteznek rövid és végtelen szál erősítésű kompozitok. A végtelen szál rendszerek előnye az alacsony fajlagos tömeg mellett elérhető nagy szilárdság, viszont folyamatos feldolgozási módszerekhez nem alkalmas. Ezzel szemben, a rövidszál erősítésű kompozitok fajlagos tömege nagyobb, szilárdságuk pedig jellemzően kisebb. Feldolgozhatóság szempontjából viszont, a rövid szál sokkal előnyösebb a végtelen szállal szemben. Végtelen szálakat előszeretettel használnak hadiiparban, repülőgép gyártásban, szélkerék lapátban; míg a rövid szálakat az autóiparban és hétköznapi területeken.

2.6. Szálak: hatás a kompozitra

A szálerősített kompozitok mechanikai tulajdonságai nagymértékben függenek a szálorientációtól. A terhelés irányával párhuzamosan álló szálak erősítő hatást fejtenek ki, az erre merőlegesen állók gyengítőt. A szálerősítés alapelve, hogy a nagy merevségű és szilárdságú szálak hordozzák a terhelést, a mátrix polimer közvetíti azt közöttük. Fontos megemlíteni, a szál-mátrix kölcsönhatások fontosságát, minél nagyobb ez a kölcsönhatás, annál nagyobb szilárdságot lehet elérni. A kapcsolat erősségét lehet növelni kapcsolóanyagok alkalmazásával, melyek a szál felületén lévő funkciós csoportok és a mátrix közötti kölcsönhatás erősségét növelik. A kapcsolóanyagok, a mátrix polimerhez hasonló polimerek azzal a különbséggel, hogy egy kapcsolódó csoport van rájuk ojtva (2. ábra). Ezek a molekulák ömledékállapotban bediffundálnak a polimer mátrixba, ahol fizikai térhálópontokat hoznak létre, a polimer láncra ojtott maleinsavanhidrid pedig kémiai reakció során kovalens kötést alakít ki a PVA szálon található OH csoporttal. A kapcsolóanyagok már kis mennyiség alkalmazása mellett is képesek hatékony feszültségátvitelt biztosítani szál és mátrix között [16,18-20].

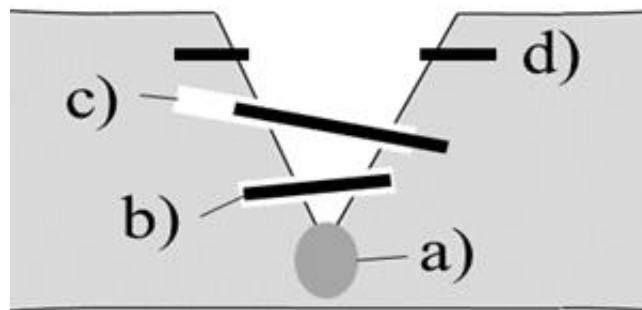


2. ábra Polipropilénre ojtott maleinsavanhidrid kapcsolódása a poli(vinil-alkohol) szállal.

2.7. Mikromechanikai deformációs folyamatok

Töltőanyagok és szálak műanyagokban történő alkalmazása esetén heterogén szerkezet jön létre. A heterogenitások körül, külső terhelés hatására feszültségkoncentrációk alakulnak ki. A heterogén feszültségeloszlás és a helyi feszültségmaximumok mikromechanikai deformációs folyamatokat indítanak el, melyek meghatározzák a kompozitok mechanikai tulajdonságait. Három tényező felelős ezekért a lokális deformációs folyamatokért: a feszültségkoncentráció, a

termikus feszültségek és az adhézió, azaz a komponensek kölcsönhatása. Mikromechanikai deformációk közül a nyírási folyásról, a mikrorepedezésről, a határfelületek elválásáról és a kavitációról kell említést tenni. A nyírási folyás kristályos polimereknél a lamellák, míg az amorf polimereknél a molekulakötegek elcsúszásával járó térfogatváltozás nélküli folyamat. A nyírási folyással ellentétben a mikrorepedezés egy térfogatváltozással járó folyamat, amely elsősorban elasztomerrel társított üveges polimerekre jellemző, de előfordul tiszta polimereknél is. Határfelületek elválása heterogén rendszerek esetén jön létre, ahol a polimer és a töltőanyag közötti adhézió külső terhelés hatására megszűnik. A mikrorepedezéshez hasonlóan ez a folyamat is térfogatnövekedéssel jár. Erős kapcsolat alakul ki elasztomerrel társított polimerekben a mátrix és az elasztomer között, olyannyira, hogy a határfelületek elválása lehetetlenné válik. Külső terhelés hatására az elasztomer csepp megnyúlik, majd elszakad és az üreg belső falára tapad. Ez a folyamat is térfogatnövekedéssel jár és kavitációnak nevezzük. Szálerősítésű kompozitokban további mikromechanikai deformációs folyamatokat is meg kell említeni (**3. ábra**), mint a száلكihúzóadás, száltördelés vagy szálak behajlása [21].



3. ábra Szálak mikromechanikai deformációs folyamatai.

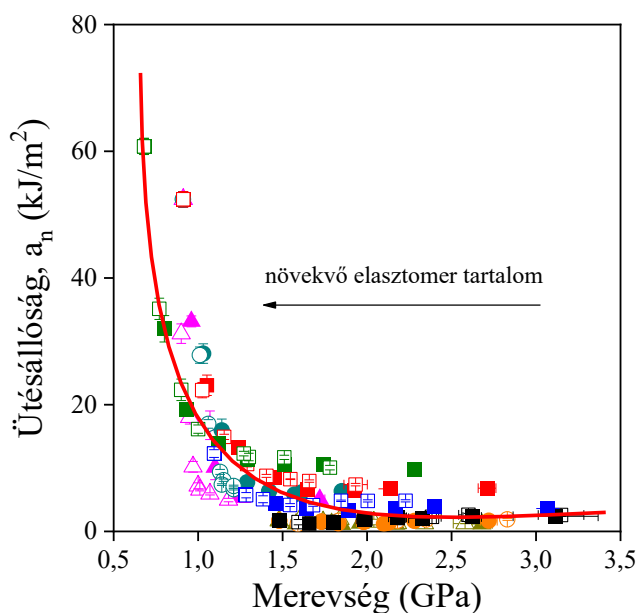
a) mátrix plasztikus deformációja b) határfelületek elválása c) száلكihúzóadás és elválás, d) szálak tördelődése

2.8. Ütésállóság

Az ütésállóság nagyon fontos tulajdonság a műanyagok gyakorlati alkalmazásához. A fogalom maga azt a deformációra fordított energiát jelenti, ami eléri vagy meghaladja az új felületek létrehozásához szükséges energiát. A nagy ütésállósághoz fontos szerepet játszik a szegmensek mozgékonyasága. Ebből következően az üvegesedési hőmérséklet felett lévő

polimerek, az elasztomerek, nagy ütésállósággal rendelkeznek. Ha az üvegesedési hőmérséklet alatti polimerek ütésállóságát szeretnénk növelni, ahhoz ütésálló adalékanyagokat kell alkalmazni. Általános érvényű megfigyelés, hogy az ütésállóság növelésével a merevség nagymértékben csökken (**4. ábra**), ezért bizonyos mértékig kompromisszumot kell kötni a két tulajdonság között.

Az ütésállóság növelésére, ahogyan azt korábban is említettem, gyakran elasztomert adnak a mátrixhoz. Egy másik megközelítés lehet, hogy hajlékony szálakat használnak, ugyanis a szálak mikromechanikai deformációs folyamatokat indíthatnak el, amik jelentős energiát nyelnek el a tönkremenetel során, ezáltal növelve az ütésállóságot.



4. ábra Falisztet és elasztomert tartalmazó kompozit ütésállósága a merevség függésében [22].

3. Kísérleti rész

3.1. Felhasznált anyagok

A mátrix, az osztrák Borealis GmbH által gyártott, HJ325MO típusú homopolimer polipropilén volt (továbbiakban: PP). Ez egy fröccsöntéshez ajánlott polipropilén típus (folyásindex: 50 g/10perc, 230°C, 2,16 kg), amiben már található gócképző és antisztatizáló adalékanyag is. A felhasznált töltőanyag az Imerys Performance Minerals által forgalmazott

Jetfine 3CA típusú talkum volt (továbbiakban: talkum). A gyártói adatlap szerint lézeres szemcseanalizátorral mérve, a részecsekék átmérőjének mediánja $3,9\text{ }\mu\text{m}$. A szál, amit használtam, a Kuraray japán cég Kuralon VPB-103 típusú poli(vinil-alkohol) szála volt (továbbiakban: PVA). A gyártó által a rendelkezésünkre bocsátott információk alapján a szálak átmérője $11\text{ }\mu\text{m}$ és hosszuk 3 mm . A szál és a mátrix közötti adhézió módosításának érdekében kapcsolóanyagot alkalmaztam, ami polipropilénre ojtott maleinsavanhidrid volt (továbbiakban: MAPP). A MAPP gyártója a német BYK-Chemie GmbH és a MAPP típusa Scona 6102. Gyártói adatlap szerint a MAPP folyásindexe 25 g/10perc (230°C , $2,16\text{ kg}$), valamint a maleinsavanhidrid tartalom $>0,9\%$. A PP/talkum kompozitban a töltőanyag tartalom $0\text{--}50\text{ m/m}\%$ között változott, a kapcsolóanyag mennyisége a töltőanyag $10\text{ m/m}\%$ volt. A hibrid kompozit esetében a töltőanyag végig egy konstans $20\text{ m/m}\%$ volt és emellett változtattam a PVA száltartalmat $0\text{--}50\text{ m/m}\%$ között. Kapcsolóanyagból a töltőanyag $10\text{ m/m}\%$ és a szál $20\text{ m/m}\%$ lett a kompozitba keverve.

Referenciaként két korábbi tanszéki kutatás eredményeit is felhasználtam. Az egyikben PP/PVA kompozitokat állítottak elő és vizsgáltak, melyekben a száltartalom $0\text{--}50\text{ m/m}\%$ között változott, majd a társítóanyag $10\text{ m/m}\%$ -nak megfelelő kapcsolóanyagot is hozzáadtak a rendszerhez. A kapcsolóanyag minden esetben a mátrix tömegének csökkenését jelentette, a kapcsolóanyag tömegének növekedésével arányosan. Egy másik kutatás során hagyományos és hibrid kompozitokat készítettek, amelyekben a merev erősítőszál az üveg- (továbbiakban: GF) vagy szénszál (továbbiakban: CF) volt. A hibrid kompozitok PVA szálakat is tartalmaztak. A ThermoFlow[®] 636 típusú üvegszálakat az amerikai Johns Manville cég gyártja, a szálak átmérője $13\text{ }\mu\text{m}$ és hosszuk 4 mm . A gyártó által biztosított információk alapján az üvegszálak szilános felületkezelésen (sizing) estek át. A magyar, Nyergesújfalun található Zoltek Zrt. gyártja a PX35 típusú szénszálakat, amelyek átmérője $7,2\text{ }\mu\text{m}$, hosszuk $8,37\text{ mm}$, valamint epoxi/poliuretán sizinggal vannak ellátva. A kísérleti munkám során felhasznált és a referencia kompozitokban alkalmazott anyagokat, továbbá a kompozitok összetételét az **1-3. táblázatok** tartalmazzák.

1. táblázat *A kompozitok készítéséhez használt anyagok.*

Anyagok	Típus	Sűrűség (g/cm ³)	Merevség (GPa)	Szilárdság (MPa)
hPP	HJ325MO	0,90	1,48	23,2
PVA	VPB-103	1,30	10	780
Talkum	Jetfine 3CA	2,78	30	n.a.
GF	ThermoFlow® 636	2,50	72	3450
CF	PX35	1,81	242	4100
MAPP	Scona 6102	0,90	1,48	23,2

2. táblázat *A fejlesztés során készített hagyományos kompozitok összetétele.*

Mátrix	Talkum (m/m%)	Kapcsolóanyag (MAPP)
PP	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	Scona 6102
HJ325MO	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	-

3. táblázat *A fejlesztés során készített hibrid kompozitok összetétele.*

Mátrix	Erősítőanyag ¹ (m/m%)	PVA (m/m%)	Kapcsolóanyag (MAPP)
PP	20	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	Scona 6102
HJ325MO	20	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	-

¹ Erősítőanyagok: talkum, CF GF,

3.2. Mintakészítés

A PP és a MAPP granulátumként állt rendelkezésemre, ezek az anyagok nem kívánnak külön eljárást, mint a szárítás, feldolgozás előtt. A talkum finom fehér porként érkezett egy zsákban és szintén nem igényel szárítást. A PVA szálak fehér, vattaszerű formában (**5. ábra**) voltak hozzáférhetőek, zsákos kiszerezésben. A PVA a többi alapanyaggal ellentétben képes megkötni a levegő nedvességtartalmát, ami a feldolgozás során degradációt idézne elő. Ez azt jelentené, hogy a szálak nagy része elhidrolizálna, ezzel rontva a végtermék tulajdonságait. A

víztartalomtól egy 4 órás 80 °C-os vákuum alatti szárítással szabadultam meg közvetlen a feldolgozás előtt.



5. ábra *A kompozit készítéshez használt VPB-103 típusú PVA szál.*

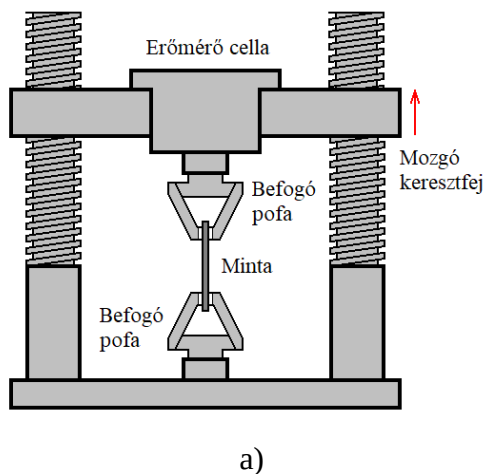
A kompozitok pontos összetételét egy műanyag zsákba mértem ki, majd jól összeráztam, ezzel is segítve a homogén beadagolást a későbbiekben. Egy kétcsigás Brabender DSK 42/7 extruderen homogenizáltam őket, melynek csigaátmérője 42 mm, L/D aránya 7. A zsinórszerszámból kilépő extrudátumot egy elhúzó és granuláló segítségével granuláltam, majd jobb homogenitás eléréséhez másodjára is leextrudáltam. A zónák hőmérsékletei a garat felől haladva 170-180-190-195 °C-ra állítottam, a fordulatszám pedig minden esetben 40 1/perc volt. A hibrid kompozit extrudálása során nagyobb száltartalom mellett nagy volt a tartózkodási idő. Ez azzal magyarázható, hogy a rendszerben egyre csökkent a mátrix anyag, a viszkozitás pedig jelentősen nőtt. A jó homogenitás érdekében, kézzel kis mennyiségekben adagoltam a keveréket a tölcsérbe, hogy a beboltozódást elkerüljem. Beboltozódás esetén az anyagáram nem lesz egyenletes, az anyag több időt tölt el a készülék fűtőzónáiban és ez degradációhoz vezet.

Fröccsöntés előtt a PVA-szálakat tartalmazó granulátumokat 4 órán keresztül 80 °C-on szárítottam, hogy ne legyen problémám a feldolgozás során. A fröccsöntéshez egy elektromos Demag IntElect 50/330-100 típusú berendezést használtam. A zónák hőmérsékletét a garattól a

fúvókáig 170-180-190-195 °C-ra állítottam. A fröccsöntést 50 mm/s befecskendezési sebesség, 50 bar torlónyomás, 25 s hűtési idő és változó, a fröccsnyomás kb. 2/3 értékének megfelelő utónyomással végeztem. A szerszámtemperáló berendezés (ToolTemp) 40 °C-ra volt állítva. A szerszámmal szabványos mérési módszerekhez használatos piskóta alakú próbatestet fröccsöntöttem. A fröccsöntött próbatesteket egy hétig pihentettem, hogy az utókristályosodás teljes mértékben végbe tudjon menni.

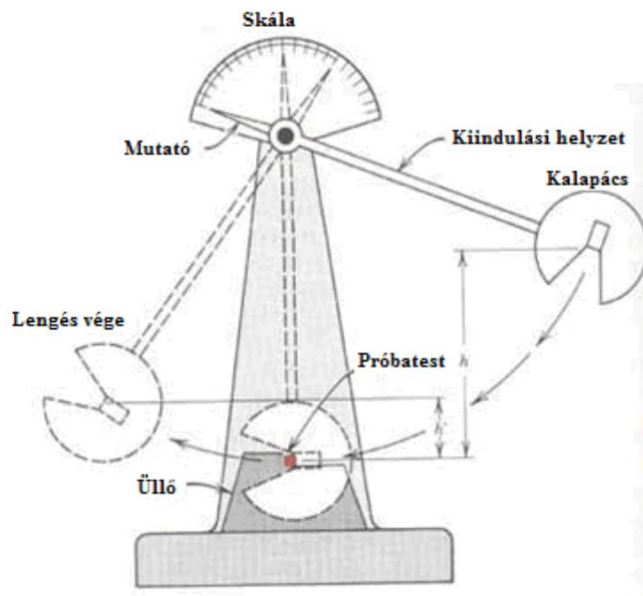
3.3. Mérési módszerek

A szakítóvizsgálatot Instron 5566 típusú berendezésen végeztem (6/a. ábra). A szakítást 5 mm/perc keresztfej-sebesség mellett határoztuk meg és a befogási távolság 115 mm volt. Akusztikus emissziós méréseket párhuzamosan végeztem (6/b. ábra) a szakítóvizsgálattal. Ehhez egy Sensophone AED 40/4-es készüléket használtam. A detektort minden mérés előtt a próbatest közepére csíptettem egy csipesszel és az érintkező felületek közé szilikonzsírt kentem, hogy elkerüljem a súrlódásból származó zavaró hanghatásokat. További zajok kiszűrésére beállítottam, hogy csak 23 dB feletti rezgéseket regisztráljon a program.



6. ábra Szakítóvizsgálat szemléltetése a) és akusztikus emissziós méréshez használt műszer b).

Charpy ütésállóság vizsgálatot egy Zwick Roell HIT 5.5P típusú berendezésen végeztem, ISO 179 szabványnak megfelelően (7. ábra). Vizsgáltam bemetszett és bemetszetlen próbatestek ütésállóságát is. A bemetszés minden esetben 2 mm volt. Műszerezett törési vizsgálatot is végeztem (fraktoszkópiát) ugyan ezen készüléken.



7. ábra Lengőingás törőberendezés.

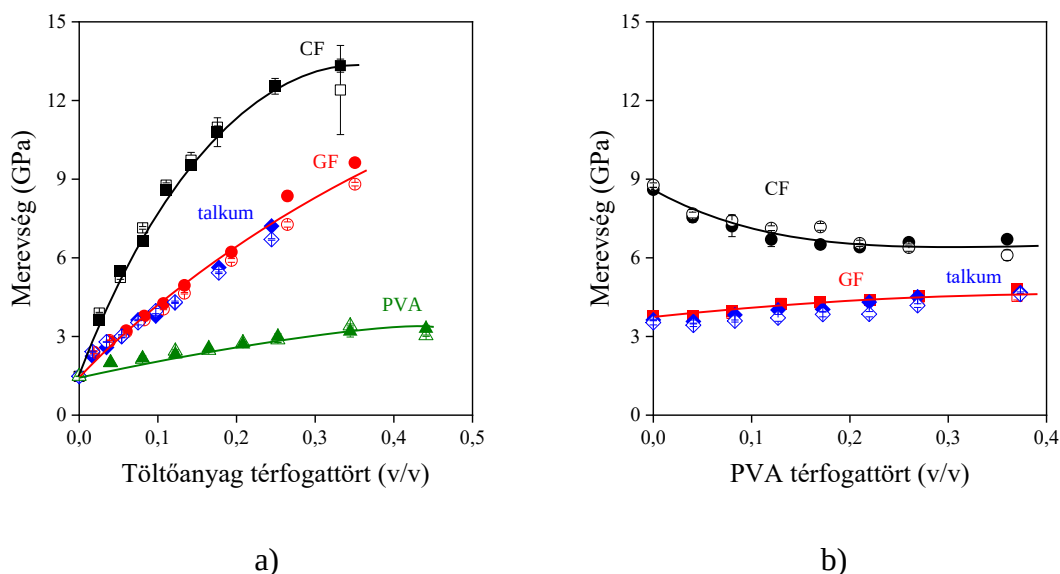
4. Eredmények és értékelésük

Az olvasót szeretném emlékeztetni, hogy a következőkben tárgyalt hibrid kompozitok a mátrix mellett minden esetben 20 m/m% töltőanyagot tartalmaztak és a PVA szálak mennyiségét növeltem 5 m/m% -os lépésekkel. Továbbá, szeretném felhívni arra is a figyelmet, a hagyományos kétkomponensű PVA, valamint a szénszál és üvegszál erősítéssel készített kompozitok referenciaként szerepelnek a dolgozatomban.

4.1. Szakítóvizsgálat

A kompozitok merevségét, azaz a szakítóvizsgálat során, a kezdeti megnyúlásnál a deformációval szembeni ellenállást tüntettem fel a töltőanyagtartalom függvényében. A **8/a. ábrán** a hagyományos kompozitok, míg a **8/b. ábrán** a hibrid kompozitok mérési eredményei láthatók. A hagyományos kompozitok esetében a töltőanyagtartalom növelésével a merevség szignifikánsan nő, a legnagyobb mértékben a szénszállal lehet növelni a merevséget, míg a talkum és az üvegszál hasonló mértékben növeli azt. Az eredmény nem meglepő, hiszen az alkalmazott társítóanyagok közül a szénszállnak a legnagyobb a merevsége (**1. táblázat**). Meg kell jegyeznünk, hogy a talkum üvegszálhoz viszonyított kereskedelmi ára jóval alacsonyabb, amely mutatja a

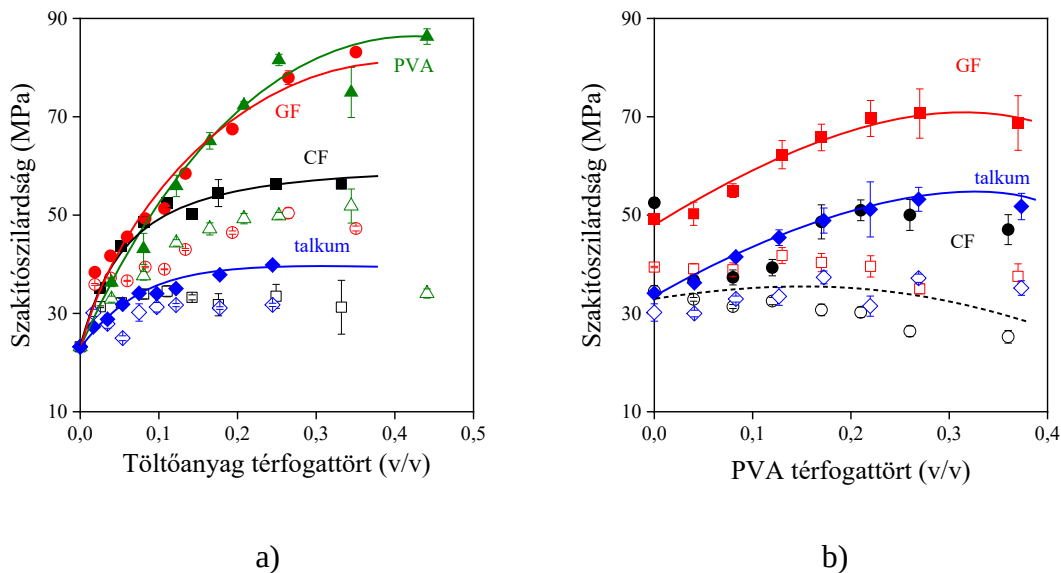
talkum nagyszerű teljesítmény/ár értékét is. A hibrid kompozitok esetében (8/b. ábra), az üveg- és a talkum erősítést tartalmazó rendszereknél a PVA szál tartalom növelésével csak kismértékben nő a merevség. A szénszál erősítésű kompozitok esetében azonban a száltartalom növelésével a merevség csökkenése figyelhető meg. Továbbá látható az ábrán az is, hogy a kapcsolóanyag hatása elhanyagolható.



8. ábra A vizsgált kompozitok merevsége a töltőanyag, illetve a PVA térfogattört függvényében ábrázolva. a) hagyományos kétkomponensű és b) hibrid kompozitok merevsége. Szimbólumok: (■, □) CF, (●, ○) GF, (◆, ◇) talkum, (▲, △) PVA. Teli szimbólumok: MAPP-vel, üres szimbólumok: kapcsolóanyag nélkül.

A 9. ábrán a szilárdsággal kapcsolatos eredmények láthatók. A szakítószilárdság az az érték, ahol az anyag, esetünkben a kompozit folytonossága megszűnik, tehát eltörik vagy elszakad. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy mind a hagyományos, mind pedig a hibrid kompozitok esetében a kapcsolóanyag alkalmazásával jóval nagyobb szilárdságot lehet elérni, mivel javítja a feszültség átvitelt. A hagyományos kompozitoknál (9/a. ábra) a legnagyobb erősítést az üveg- és PVA-szálak felhasználásával lehet elérni. Az alkalmazott szálak nagy mértékben képesek viselni a terhelést, amelyet a mátrix közvetít, ehhez viszont elengedhetetlen a megfelelő szál-mátrix kölcsönhatás. A hibrid kompozitok esetében (9/b. ábra) érdemes megjegyezni, hogy a nagy teljesítményű szénszálak hibrid kompozitokhoz hasonló szilárdságot lehet elérni a talkum/PVA kompozitok segítségével is. Ez az eredmény nagy jelentőséggel bírhat az ipar számára, hiszen nagy

szilárdságú és olcsó alapanyagra mindig szükség lesz. A kompozitok árával kapcsolatban érdemes megjegyezni, hogy a talkum sokkal olcsóbb alapanyagnak számít, mint a szénszál, így a helyettesítés ésszerű lehet.



9. ábra A hagyományos a) és a hibrid b) kompozitok szakítószilárdsága a töltőanyagtartalom függvényében. *Szimbólumok:* (■, □) CF, (●, ○) GF, (◆, ◇) talkum, (▲, △) PVA. *Teli szimbólumok:* MAPP-vel, *üres szimbólumok:* kapcsolóanyag nélkül.

Szálerősítésű kompozitokban fontos tényező, a szálakkal elérhető erősítés mértéke, ezt egy korábban szakítószilárdság összetétel függésének leírására fejlesztett modell segítségével kapjuk meg [23]. A modell tartalmazza a mátrix tulajdonságait (σ_{T0}), a mátrix effektív keresztmetszetét ($\frac{1-\varphi}{1+2,5\varphi}$), a nyúlási keményedést (λ^n) és a határfelületi kölcsönhatások szerepét [$\exp(B_T\varphi)$] (1. egyenlet).

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \lambda^n \frac{1-\varphi}{1+2,5\varphi} \exp(B_T\varphi) \quad (1.)$$

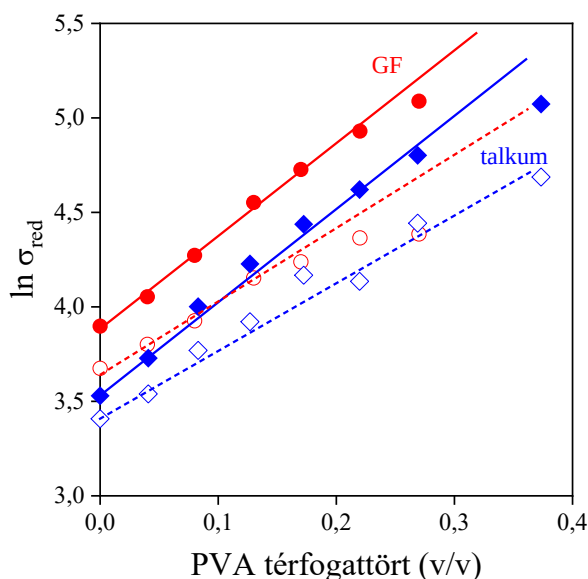
ahol, σ_T a kompozit valódi szilárdsága, σ_{T0} a mátrix valódi szilárdsága, λ a relatív megnyúlás ($\lambda = \frac{L}{L_0}$), L a kompozit szakadási nyúlása, L_0 pedig a próbatest kezdeti hossza és φ a szál térfogattörtje. Nyúlás hatására keresztmetszetszökkenés jön létre, emiatt van szükség a valódi feszültség kiszámítására. A kiindulási keresztmetszet felhasználásával számolt mérnöki

feszültségnél, a nagy nyúlások szakadási pillanatában mérhető valódi feszültségnél lényegesen nagyobb.

1. egyenlet linearizált formája:

$$\ln \sigma_{T_{red}} = \ln \frac{\sigma_T(1+2,5\varphi)}{\lambda^n(1-\varphi)} = \ln \sigma_{T0} + B\varphi \quad (2.)$$

A linearizált egyenes meredeksége, a B paraméter a szál teherhordó képességével, vagyis a szállal elérhető erősítés mértékével van kapcsolatban. Számoláshoz, a hibrid kompozitok esetében a 20 m/m% erősítőanyagot tartalmazó minták szakítószilárdságát vettem a mátrix szakítószilárdságának és a térfogattörtbe pedig a PVA szál térfogattörtjét helyettesítettem. A modell linearizálása után kapott eredményeket a **10. ábrán** és a **4. táblázatban** mutatom be. A B paraméter, esetünkben a PVA szál teherhordó képességét mutatja meg. A szakítóvizsgálat során, kapcsolóanyag alkalmazása mellett, erős adhézió esetén a PVA szál nagyobb mértékben viseli a terhelést, mint gyenge adhézió esetén. Az üvegszál és a talkumot tartalmazó hibrid kompozitoknál a PVA szál hasonló mértékben képes viselni a terhelést, ez látszódik az illesztett egyenesek meredekségéből.



10. ábra A hibrid kompozitokra illesztett B paraméteres modell. Szimbólumok: (●,○) GF, (◆,◇) talkum.

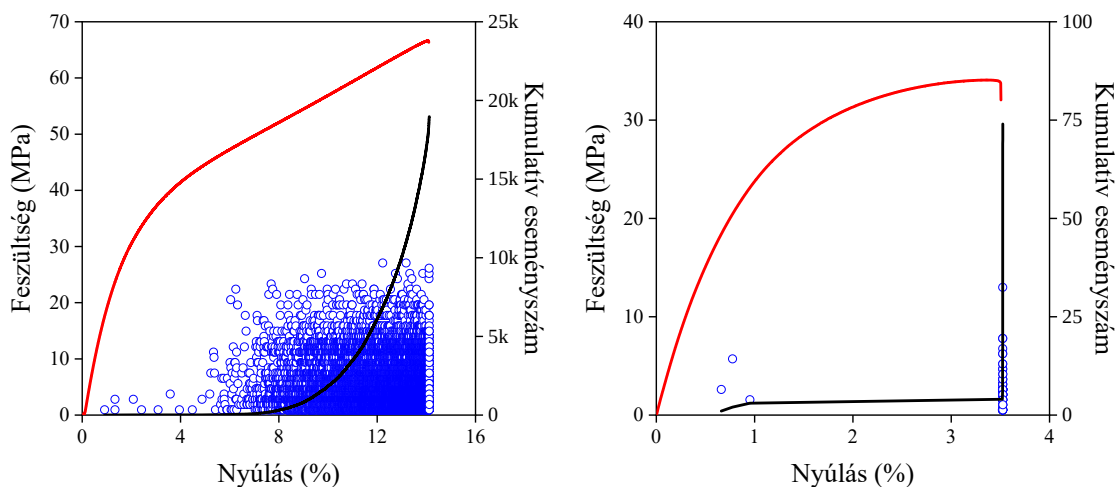
4. táblázat A hibrid kompozitokra illesztett modell B_t paraméterei és az illesztés jósága.

Kompozit	Kapcsolóanyag	B_t paraméter	R^2
CF/PVA	-	2,56	0,9913
	+	4,77	0,9799
GF/PVA	-	3,24	0,9895
	+	4,58	0,9926
talkum/PVA	-	3,08	0,9875
	+	4,80	0,9912

4.2. Akusztikus emissziós vizsgálat

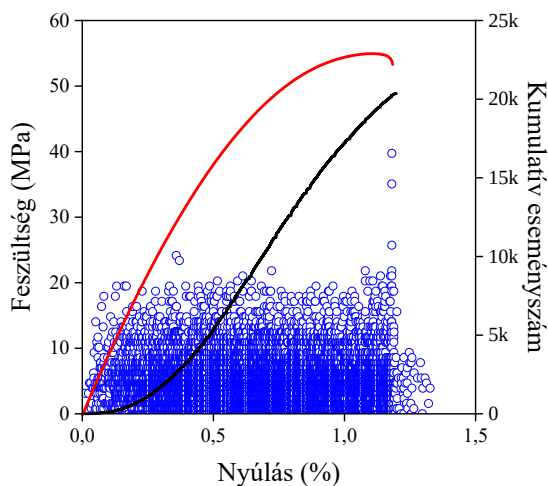
A szakítóvizsgálattal párhuzamosan akusztikus emissziós mérést is végeztem. A **11. ábrán** PVA szálát, talkumot vagy szénszálát tartalmazó hagyományos kompozitok feszültség nyúlás görbéi láthatóak, mellettük pedig az akusztikus emissziós mérés eredményeit tüntettem fel. Az egyes pontok a deformáció során lejátszódó egyedi eseményeket jelölik, minden ilyen esemény vagy jel forrása valamilyen mikromechanikai deformációs folyamat. A pontok elhelyezkedése és eloszlása sok információt hordoz, nehéz értelmezni őket, ezért az ábrán fekete színű görbével feltüntetett kumulált eseményszám görbét hoztam létre, amely adott deformációig összegzi az egyedi események számát. A görbék alakja és az eseményszám információval szolgálhat arról, hogy mi a domináló deformációs folyamat. A PVA szálas kompozit esetén (**11/a. ábra**) nagyobb deformációnál megkezdődik a szálak szakadása és kismértékű kihúzódása. A talkumot tartalmazó kompozitban (**11/b. ábra**) elhanyagolható mennyiségű jelet detektálunk, amely annak tudható be, hogy a kisméretű szemcsék az elválás során nem adnak az akusztikus emissziós módszerrel is detektálható jelet. A következő ábrán (**12. ábra**) láthatók a hibrid, azaz már PVA szálakat tartalmazó kompozitok akusztikus emissziós eredményei. A hibrid kompozitok esetében jóval nagyobb jelszámot detektáltunk, amely a PVA szálakhoz köthető. A CF/PVA (**12/b. ábra**) hibrid kompozit esetében két elkülöníthető folyamat határozható meg, a deformáció kezdeti szakaszában a szénszálak tördelődése és a szálak kihúzódása figyelhető meg, míg a tönkremenetel előtt a PVA szálak szakadása a domináló deformációs folyamat. A talkum/PVA (**12/a. ábra**) hibridek esetében a kezdeti szakaszban nem detektáltunk jelet. A tönkremenetel előtt, hasonlóan a szénszálas kompozitokhoz a PVA szálak szakadása ad jelet. A feltételezett deformációs folyamatok igazolhatók a pásztázó elektronmikroszkópos felvételek segítségével is, amelyeket dolgozatomban későbbi fejezetemben mutatok be. A következő fejezetben látható a CF/PVA és a talkum/PVA kompozitok

szilárdságában és ütésállóságában nem volt jelentős különbség, viszont a tönkremenetel során a mechanizmusok eltérőek, amelyet az AE jelek jelenléte vagy éppen a hiánya is bizonyít, ugyanakkor ezek az eltérő folyamatok közel azonos mennyiségű energiát nyelnek el.



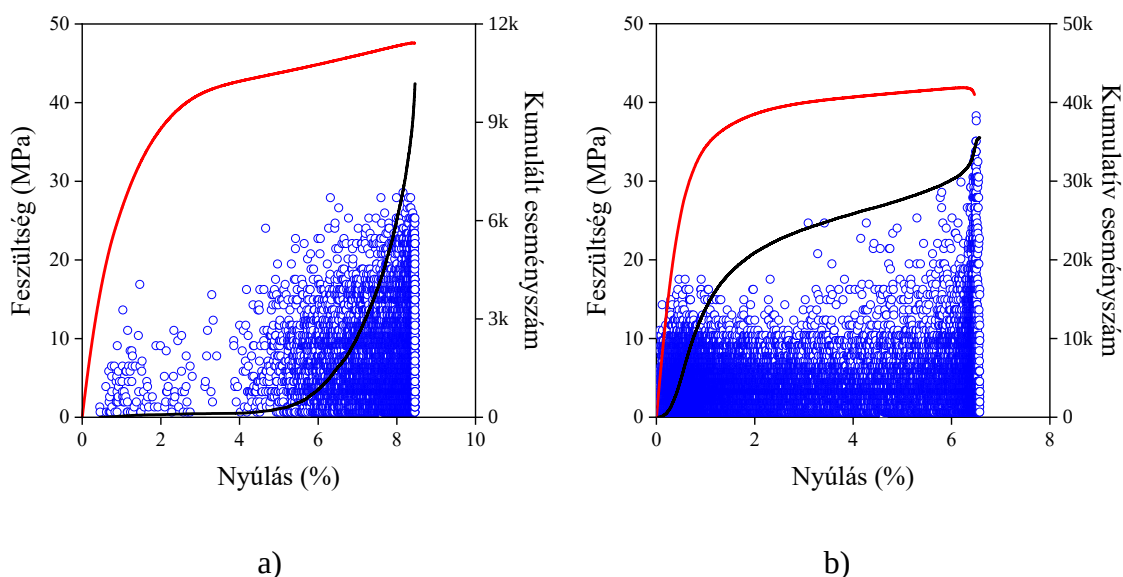
a)

b)



c)

11. ábra 20 m/m% töltőanyagot és kapcsolóanyagot tartalmazó kétkomponensű kompozitok akusztikus emissziós vizsgálatának eredményei. a) PVA/MAPP, b) talkum/MAPP, c) CF/MAPP

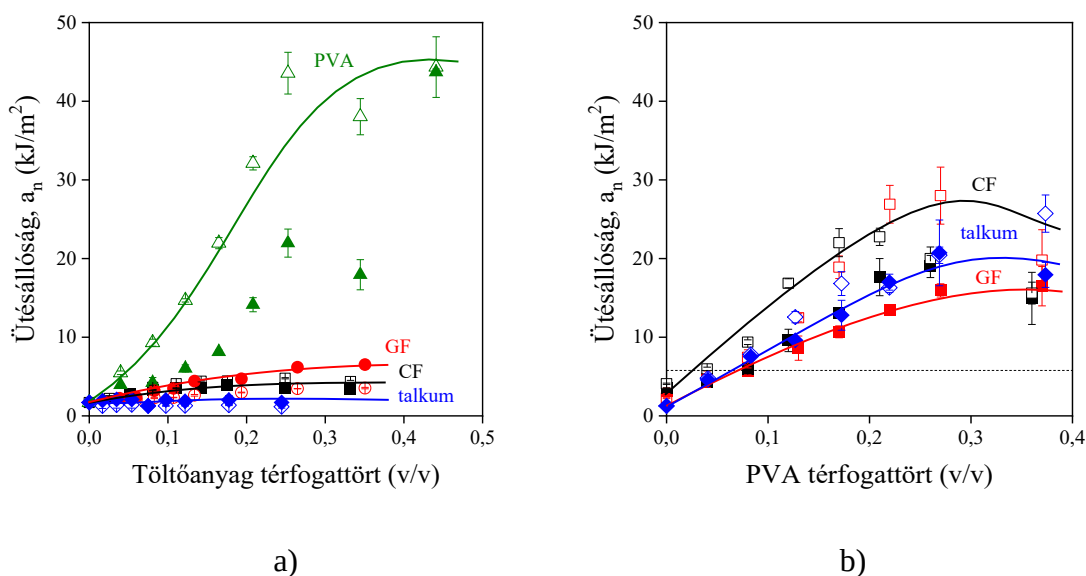


12. ábra 20 m/m% töltőanyagot, 15 m/m% PVA szálát és kapcsolóanyagot tartalmazó hibrid kompozitok akusztikus emissziós vizsgálatának eredményei. a) talkum/PVA, b) CF/PVA

4.3. Törővizsgálat

A **13. ábrán** a kompozitok töréssel szembeni ellenállásának eredményeit mutatom be. A **13/a. ábrán** látható, hogy a nagyobb alaki tényezővel rendelkező szálak erősítőanyagok nagyobb ütésállóságot biztosítanak, mint a talkum. A kapcsolóanyagot tartalmazó és kapcsolóanyag nélküli hagyományos talkum erősítésű kompozitok rossz ütésállósága a talkum szemcsék nagy merevségével és azok meglehetősen kis deformálhatóságával magyarázható, mert ahogyan korábban említettem a töltőanyag tulajdonságai nagy hatással vannak a kompozit végső tulajdonságaira. Nem csak a talkum, de a szálak is csökkentik a polimer láncok mozgékonyágát, viszont ezek lokális deformációs folyamatok során valamennyi energiát képesek elnyelni és így kompenzálják az általuk okozott merevség növekedést. A PVA szállal kiemelkedően nagy ütésállóság érhető el, amely a polimer szál hajlékonyságához, illetve a szálhoz kapcsolódó lokális deformációs folyamatokhoz köthető [2]. A szál hajlékonyságának köszönhetően gátolja a repedés gyors terjedését, valamint a szálak elválása iniciálja a mátrix plasztikus deformációját, amely nagyon sok energiát nyel el, ezáltal növelve az ütésállóságot. A törés során ugyanakkor nagyon sok folyamat megy végbe, amelyek energiát nyelnek el, ezek azonosítása elengedhetetlen ahhoz, hogy jobban megértsük a töltőanyagok ütésállóság módosító hatását. Az előbb tárgyalt folyamatok lejátszódását a pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek és az akusztikus mérési

eredmények (AE) is alátámasztják, amelyeket a későbbiekben mutatok be. A **13/b. ábrán** a szaggatott vonallal tüntettem fel a hagyományos, merev szálakat tartalmazó kétkomponensű kompozitok segítségével maximálisan elérhető ütészállóság értéket. Az eredményekből látható, hogy már 15 m/m% PVA szál alkalmazása esetén is jóval nagyobb ütészállóságot lehet elérni, mint a hagyományos kompozitokkal. Érdeemes megjegyezni, hogy a hibrid kompozitok esetében a nagyteljesítményű szénszállhoz hasonló eredményt értünk el talkum felhasználásával.

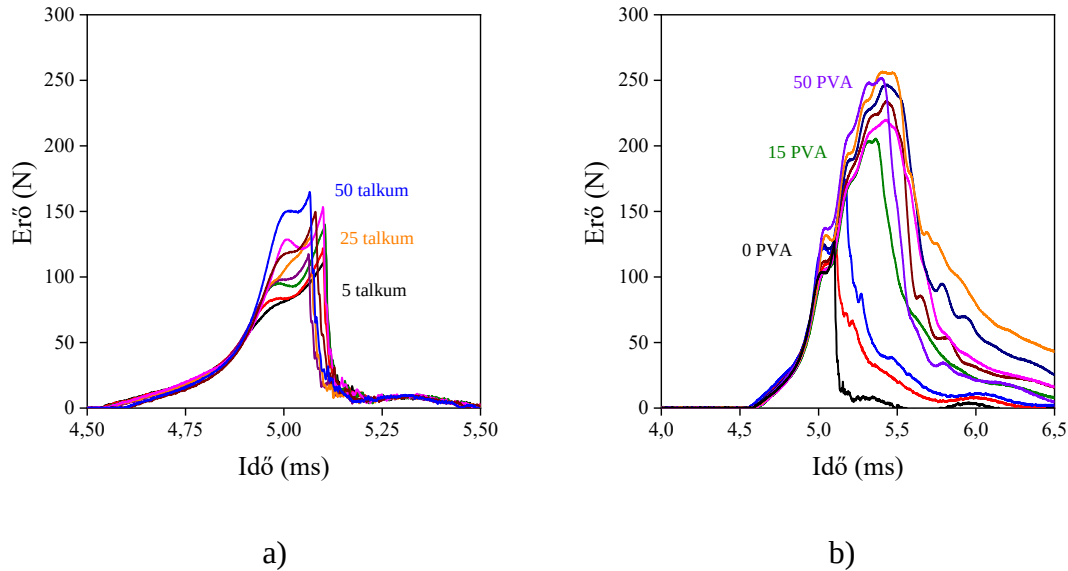


13. ábra A kompozitok Charpy ütészállósága. a) hagyományos és b) hibrid kompozitok

Szimbólumok: (■, □) CF, (●, ○) GF, (◆, ◇) talkum, (▲, △) PVA. Teli szimbólumok: MAPP-vel, üres szimbólumok: kapcsolóanyag nélkül.

Hagyományos törési vizsgálatok segítségével csak a törési energia nagyságát lehet meghatározni. Ahhoz, hogy a törés jellegéről (rideg, szívós vagy képlékeny) is információt kapjunk, műszerezett törővizsgálatot kell végezni. A **14. ábrán** műszerezett törési vizsgálat eredményei láthatóak. A maximális erő eléréséig tartó szakasz a repedés kialakulását, az utána következő negatív meredekségű szakasz pedig a repedés terjedését mutatja. A görbék alatti terület arányos a törés során elnyelt energiával. A PP/talkum esetében látszódik, hogy rideg törés ment végbe minden esetben, de a repedés iniciálásához szükséges erő kis mértékben nőtt a talkum mennyiségének növelésével (**14/a. ábra**). A PVA szálakat is tartalmazó hibrid kompozitok törési

jellege ridegből szivóssá változik (**14/b. ábra**), tehát az erő maximuma elérése után a repedés nem pillanatszerűen halad át a próbatest keresztmetszetén. A repedés terjedését többletenergia elnyelés kíséri, mert a hajlékony polimer szálak akadályozzák annak gyors terjedését és ez növeli az ütésállóságot.



14. ábra A kompozitok műszerezett törése során regisztrált fraktogramok, változó talkum és PVA szál tartalom mellett. a) PP/talkum b) PP/talkum/PVA

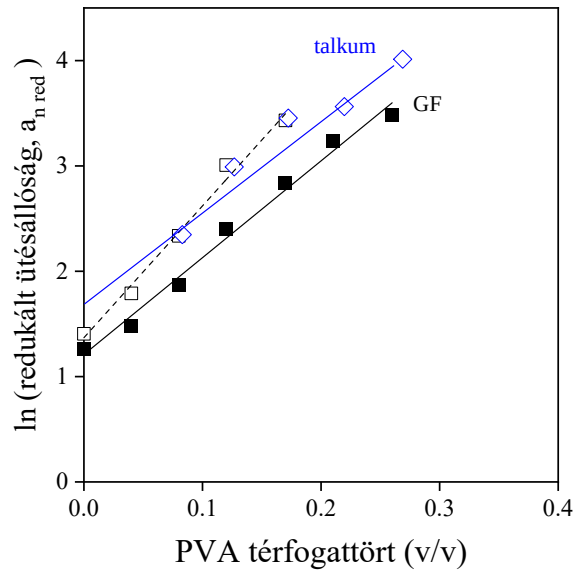
A dinamikus igénybevételeknél meghatározott ütésállóság értékek esetén is alkalmazható egy modell, amely segítségével számszerűsíteni tudjuk az alkalmazott polimer szál ütésállóság javító hatását (**3. egyenlet**).

$$a_n = \frac{a_{n0}}{\frac{E}{E_0}} \frac{1-\varphi}{1+2,5\varphi} \exp(B_f \varphi) \quad (3.)$$

Az egyenletben szereplő a_n a kompozit és a_{n0} a mátrix bemetszett ütésállósága, E a kompozit és E_0 a mátrix rugalmassági modulusa, φ a szál térfogattörtje, B_f a társítóanyag ütésállóságára gyakorolt hatásával van összefüggésben. Az ütésállóság négy tényezőtől függ a modell alapján: a mátrix tulajdonságától (a_{n0}), a kompozit és a mátrix modulusának hányadosától ($\frac{E}{E_0}$), a mátrix határos teherhordó keresztmetszetében bekövetkező csökkenéstől ($\frac{1-\varphi}{1+2,5\varphi}$) és a határfelületi kölcsönhatásoktól ($B_f \varphi$). Az egyenlet felírható linearizált formában (4. egyenlet).

$$\ln a_{nred} = \ln a_n \frac{E}{E_0} \frac{1+2,5\varphi}{1-\varphi} = \ln a_{n0} + B_f \varphi \quad (4.)$$

A linearizált egyenlet meredeksége a B_f paraméter (**15. ábra**), amely a PVA szál ütésállóságra gyakorolt hatásával van kapcsolatban. A számításokat a korábbi modellillesztéssel megegyező módon végeztem. Az **5. táblázatban** láthatjuk a B_f értékeket, amelyek a kapcsolóanyagot tartalmazó hibridek esetén kisebbek voltak, mint a kapcsolóanyag nélkülieké. Kapcsolóanyag használatával erősebb adhéziót értünk el a szál és a mátrix között, így a szálakhoz kapcsolódó lokális deformációs folyamatok nem, vagy csak kisebb mértékben játszódnak le, így kevesebb energiaelnyelő folyamat indul el, amely hatással van az ütésállóságra. Meg kell említeni, hogy a szálak töréséhez több energia szükséges, mint azok kihúzódáshoz. Ugyanakkor a szálak kihúzódása iniciálja a mátrix plasztikus deformációját, amelyek együttesen már jóval több energiát képesek elnyelni a töréshez viszonyítva. Utóbbi folyamatok azonban csak gyenge szál-mátrix kölcsönhatások esetén játszódhatnak le.



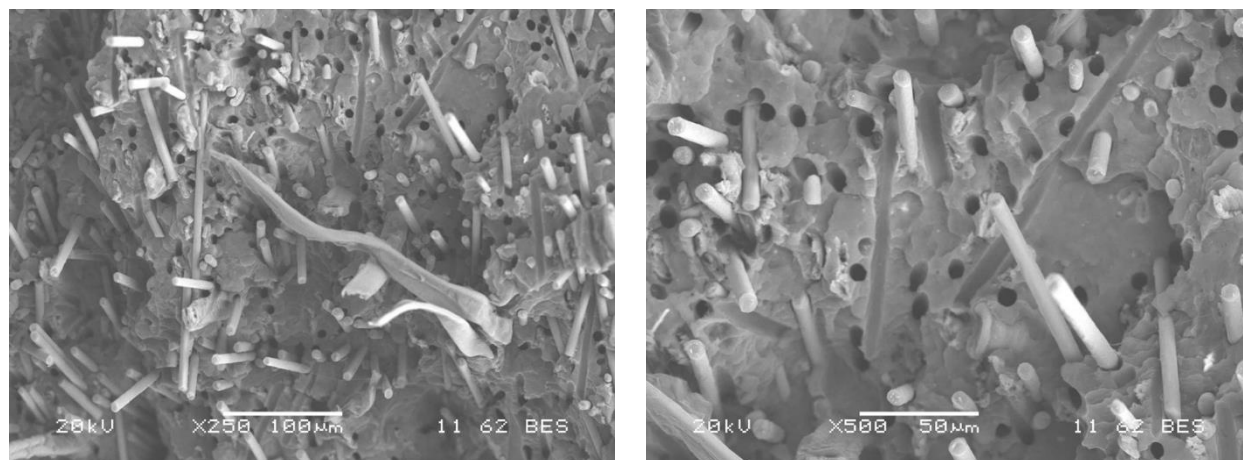
15. ábra A hibrid kompozitokra illesztett B paraméteres modell. Szimbólumok: (■, □) CF, (◆, ◇) talkum.

5. táblázat A hibrid kompozitokra illesztett modell B_t paramétereit és az illesztés jósága.

Kompozit	Kapcsolóanyag	B_t paraméter	R^2
CF/PVA	-	12,51	0,9886
	+	9,19	0,9881
GF/PVA	-	14,97	0,9855
	+	9,79	0,9891
talkum/PVA	-	8,51	0,9466
	+	7,75	0,9206

4.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

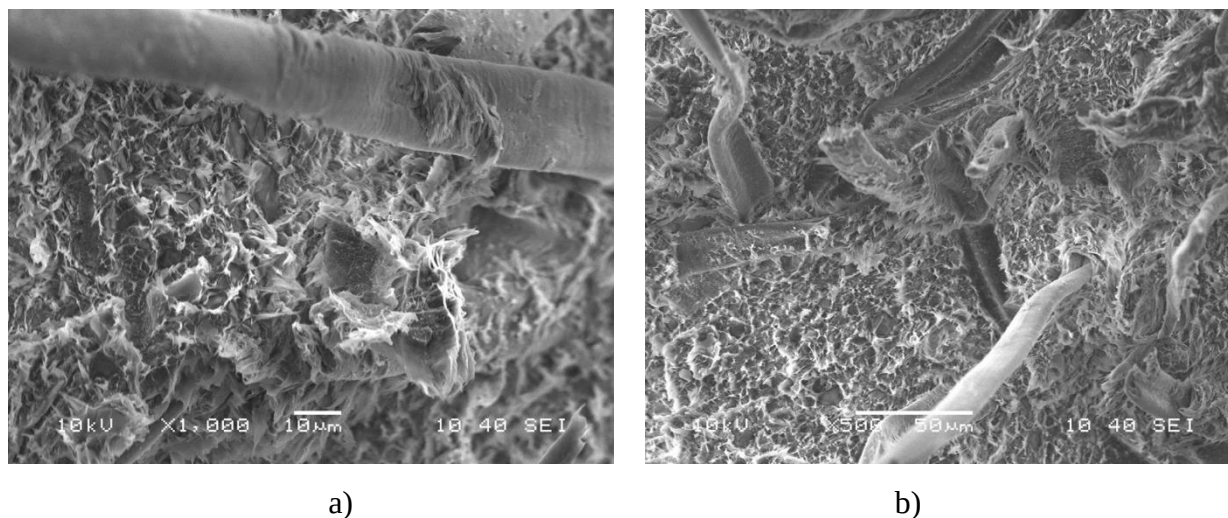
A lejátszódó deformációs folyamatok azonosításához a kompozitok szakadási felületéről pásztázó elektronmikroszkóp segítségével készítettünk felvételeket. Mind a talkum/PVA, mind pedig a CF/PVA kompozitok esetében látható a PVA szálak szakadása és kismértékű kihúzódnása. A szénszálas kompozitok esetében a szálak tördelődése és kihúzása látható (**16. ábra**), míg a talkumos kompozitok esetén a talkum szemcsék elválása és a szemcsék környezetében végbemenő plasztikus deformáció fedezhető fel (**17. ábra**). Utóbbi folyamatok nem adnak akusztikus emissziós jelet, ezért a mikromechanikai deformációs folyamatokat szemléltető ábrán (**12/a. ábra**) ezek nem voltak azonosíthatóak.



a)

b)

16. ábra A 20 m/m% szénszálat, 20 m/m% PVA szálat és kapcsolóanyagot tartalmazó kompozitról készült SEM felvétel.

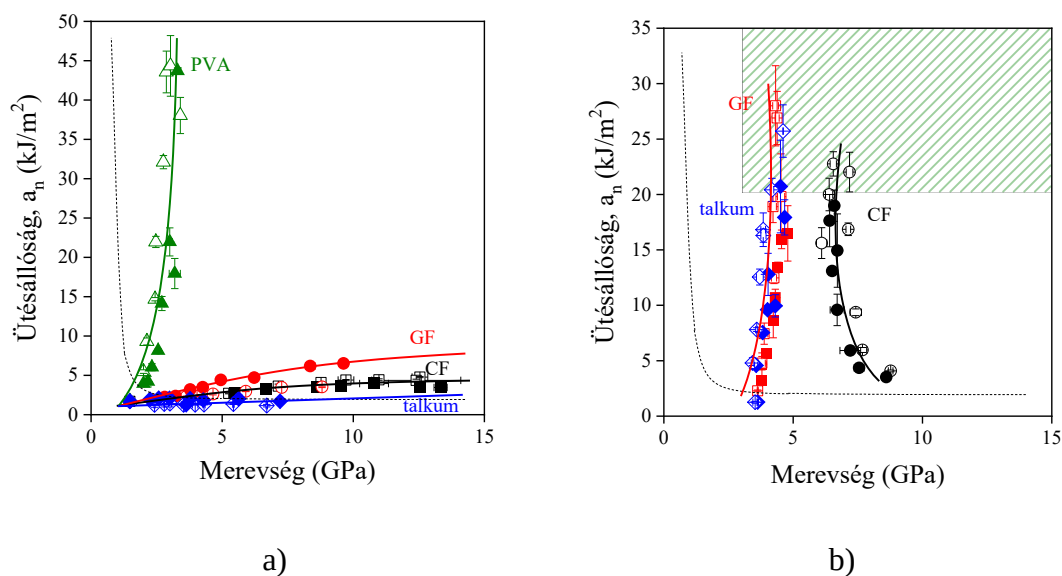


17. ábra A 20 m/m% talkumot, 20 m/m% PVA szálat és kapcsolóanyagot tartalmazó kompozitról készült SEM felvétel.

5. Összefoglalás

Dolgozatom elején említettem, hogy a kutatómunka célja olyan kompozitok létrehozása, amelyek ütésállósága és merevsége is egyaránt kiemelkedően nagy. A **18/a. ábrán** a hagyományos, kétkomponensű kompozitok ütésállóságát tüntettem fel a merevség függvényében. Ahogyan azt látni lehet ezekkel a kompozitokkal nem sikerült nagy ütésállóságot elérni, a merev szálakkal készített kompozitok kapcsolóanyaggal és kapcsolóanyag nélkül sem javít a homopolimer ütésállóságán. Az általam készített PP/talkum kompozitok sem jelentettek áttörést a korábban említett probléma megoldására. A referenciaként feltüntetett PP/PVA kompozitokban található hajlékony polimer szálak jelentősen növelték az ütésállóságot, azonban a merevséget nem befolyásolták jelentősen. A **18/b. ábrán** a hibrid kompozitok mérési eredményei láthatók. A polimer szálak és merev erősítőanyagok polipropilénben való együttes alkalmazásával kiemelkedően nagy ütésállóságot és merevséget értünk el függetlenül a töltőanyag típusától. Ipari alkalmazásra a tulajdonságok megfelelő kombinációját sikerült elérni, továbbá a talkum/PVA kompozitok eredményei alapján kijelenthető, hogy azok költséghatékony alternatívaként léptek elő a drágább CF/PVA és GF/PVA kompozitok helyettesítésére. Továbbá a talkumot tartalmazó hibrid kompozitokban, a CF és GF hibridekhez képest, különböző deformációs mechanizmusok játszódnak le, amiket akusztikus emissziós és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal is

alátámasztottunk. Az eltérő mechanizmusoktól függetlenül, megfelelően nagy ütésállóság és merevség érhető el talkum hibridizáció alkalmazásával.



18. ábra A kompozitok Charpy ütésállósága a merevség függvényében ábrázolva. a) hagyományos és b) hibrid kompozitok Szimbólumok: (■, □) CF, (●, ○) GF, (◆, ◇) talkum, (▲, △) PVA. Teli szimbólumok: MAPP-val, üres szimbólumok: kapcsolóanyag nélkül. Csíkozott zöld terület: az ipar által kívánt tulajdonságok.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek Várdai Róbertnek, a rengeteg szakmai segítséget és ötletet, amit tőle kaptam, valamint idejét és türelmét, amit rám szánt. Köszönöm a Műanyag- és Gumiipari Laboratórium összes munkatársának a kapott biztatást és segítséget. Továbbá köszönöm családomnak és barátaimnak a sok támogatást és megértést.

7. Irodalomjegyzék

1. Várdai R. LT, Pretschuh C., Jerabek M., Gahleitner M., Bartos A., Móczó J., Anggono J., Pukánszky B.: Improvement of the impact resistance of natural fiber–reinforced polypropylene composites through hybridization. (2021)
2. Várdai R. LT, Pretschuh C., Jerabek M., Gahleitner M., Faludi G., Móczó J., Pukánszky B.: Reinforcement of PP with polymer fibers: Effect of matrix characteristics, fiber type and interfacial adhesion. (2020)
3. Flowers B. Automotive applications for polypropylene and polypropylene composites. In: Karian H, editor. Handbook of polypropylene and polypropylene composites, revised and expanded. Boca Raton: CRC Press, p. 578-586 (2003)
4. Lummerstorfer T. JM, Hochradl S., Pretschuh C., Renner K., Sobczak L., Stockreiter W., Pukánszky B., Moczo J. Fiber reinforced polypropylene composite. BOREALIS AG p., (2016)
5. Gauthier WJ. Elastomeric polypropylene homopolymers using metallocene catalysts. In: Karger-Kocsis J, editor. Polypropylene: An A-Z reference. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 178-185 (1999)
6. Dao KC, Hatem RA. Properties of blends of rubber talc polypropylene. *Plast Eng* **40**, 31-31 (1984)
7. Móczó J, Pukánszky B. Particulate filled polypropylene: structure and properties. In: Karger-Kocsis J, Bárány T, editors. Polypropylene handbook: morphology, blends and composites. Cham: Springer International Publishing, p. 357-417 (2019)
8. Thomason JL, Vlugg MA. Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus. *Compos Part A Appl Sci Manuf* **27**, 477-484 (1996)
9. Güneri A. Polymers in construction. Shrewsbury: Rapra Technology Limited; (2005)
10. Elliott ANA. Automotive applications of polymers II. Shrewsbury: Rapra Technology Limited p., (1992)
11. Chengcheng Gao LY, Hongsheng Liu, Ling Chen. Development of self-reinforced polymer composites. (2011)
12. Pukánszky B. Interfaces and interphases in multicomponent materials: Past, present, future. *Eur Polym J* **41**, 645-662 (2005)
13. Bourmaud A, Pimbert S. Investigations on mechanical properties of poly(propylene) and poly(lactic acid) reinforced by miscanthus fibers. **39**, 1444-1454 (2008)
14. G. W. An observation on Mohs' Scale of Hardness. (1986)
15. Noushini A. SB, Vessalas K.: Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. (2013)
16. Móczó J, Pukánszky B. Polymer micro and nanocomposites: Structure, interactions, properties. *J Ind Eng Chem* **14**, 535-563 (2008)

17. A. R. Bunsell JR. Fundamentals of Fiber Reinforced Composite Materials: CRC Press; (2005)
18. Dányádi L. Interfacial interactions in fiber reinforced thermoplastic composites [Ph. D. Thesis](2009)
19. Pukánszky B, Fekete E. Adhesion and surface modification. In: Jancár J, editor. Mineral Fillers in Thermoplastics I. Berlin: Springer-Verlag, p. 109-153 (1999)
20. Hee-Soo Kim B-HL, Seung-Woo Choi, Sumin Kim, Hyun-Joong Kim. The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. (2007)
21. Renner K. Micromechanical deformation processes in polymer composites: Budapest University of Technology and Economics; (2010)
22. Sudár A, Renner K, Móczó J, Lummerstorfer T, Burgstaller C, Jerabek M, Gahleitner M, Doshev P, Pukánszky B. Fracture resistance of hybrid PP/elastomer/wood composites. *Compos Struct* **141**, 146-154 (2016)
23. Pukánszky B. Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites. *Composites* **21**, 255-262 (1990)