

POLIOLEFIN - SZÉN NANOCső NANOKOMPOZITOK JELLEMZŐINEK ÁTTEKINTÉSE

REVIEW ON THE PROPERTIES OF POLYOLEFIN - CARBON NANOTUBE NANOCOMPOSITES

Antaliczné Nagy Dorottya ^{1*}

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország, <https://orcid.org/0009-0006-7063-6284>
<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.006>

Kulcsszavak:

poliolefin
nanokompozit
szén nanocső
polimer blend
kompatibilitás

Keywords:

polyolefin
nanocomposite
carbon nanotube
polymer blend
compatibility

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 25.
Átdolgozva 2026. február 1.
Elfogadva 2026. február 3.

Összefoglalás

A polipropilénből (PP) és polietilénből (PE) készült keverékek alkalmazása előnyös lehet, mivel ötvözik a PP mechanikai szilárdságát a PE ütésállóságával és jó hidegtűrésével. Hátrányuk, hogy termodinamikailag nem elegyednek, vagyis az alapanyagokénál rosszabb tulajdonságokat tapasztalhatunk, ezért egy harmadik összetevőt kell hozzáadni a keverékhez, hogy kompatibilizáljuk. Ilyen kompatibilizálószerke lehetnek a nanorészecskék (leggyakrabban szén nanocső), amelyek szelektíven az egyik fázisban vagy a fázishatáron helyezkednek el, így erősítve a keveréket. Mivel a szakirodalomban csak elvétve találni PP/PE/CNT nanokompozitokat, ezért először a poliolefin (PP vagy PE) bázisú nanokompozitok tulajdonságait, majd a PP/PE keverékekét, végül a PP/PE bázisú nanokompozitok tulajdonságait tekintem át.

Abstract

Applying blends of polypropylene (PP) and polyethylene (PE) can be beneficial, because the blends combine mechanical properties of PP and impact and cool resistance of PE. However they are thermodynamically immiscible, so the properties of the blends can degrade. For compatibilizing, a third component must be added to the mixture. These compatibilizers can be nanomaterials (often carbon nanotube, CNT), which will selectively localize in one or another phase or on the interphase. As in the literature there are just a few studies of PP/PE/CNT nanocomposites, first properties of polyolefin-based (PP or PE) nanocomposites, then of PP/PE blends, finally properties of PP/PE nanocomposites will be reviewed.

1. Bevezetés

A poliolefinek és keverékeik a legszélesebb körben forgalmazott termoplasztok közé tartoznak[1]. A poliolefineken az olefin (vagy másnéven alkén) monomerekből láncpolimerizációval készült polimereket és ezek keverékeit értjük[2]. Ide tartozik a polipropilén (PP), a különböző polietilén (PE) típusok (kissűrűségű-LDPE, nagysűrűségű- HDPE, lineáris kissűrűségű- LLDPE), a polibutilén (PB) vagy a poliizobutilén (PIB). A polipropilénből és polietilénből készült keverékek alkalmazása előnyös lehet, mivel ötvözik a PP mechanikai szilárdságát a PE ütésállóságával és jó hidegtűrésével. Kopolimereket is használhatunk, amelyeket az etilén és propilén egységek polimerizációjával kapunk. A PE fázis mennyiségétől függően kaphatunk egy szilárdabb,

* Kapcsolattartó szerző: Antaliczné Nagy Dorottya
E-mail cím: nagy.dorottya@nje.hu

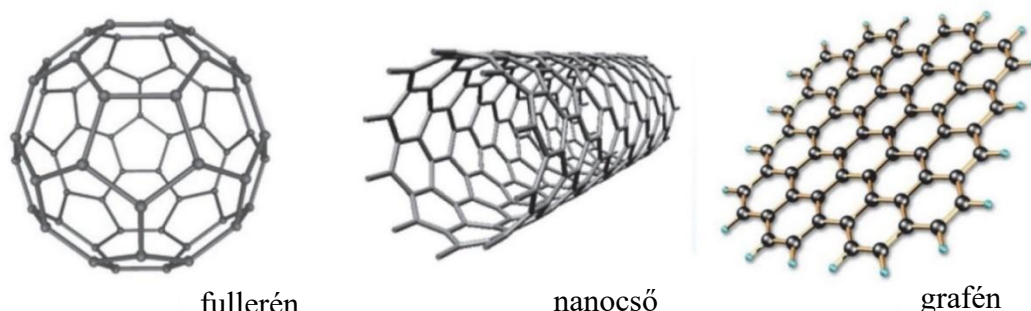
PP-re hasonlító vagy egy rugalmasabb, gumira hasonlító anyagot (EPR) [3]. A keverékek hátránya, hogy termodinamikailag nem elegyednek, vagyis az alapanyagokénál rosszabb tulajdonságokat tapasztalhatunk, ezért egy harmadik összetevőt kell hozzáadni a keverékhez, hogy kompatibilizáljuk, összeférhetővé tegyük a komponenseket [4].

A poliolefineket egyre gyakrabban alkalmazzák kompozit anyagok mátrixaként is, például autóiipari alkatrészekben, mivel ár-érték arányuk és az elérhető tömegcsökkentés miatt előnyösebbek sok műszaki műanyagnál [5]. A kompozit anyagok tulajdonságait a mátrix, az erősítőanyag és a kettő fázis közötti határfelület határozza meg. Az erősítőfázis morfológiája lehet szemcsés, szálas vagy lemezes. Nanokompozitról akkor beszélünk, ha az erősítőanyag legalább egyik jellemző mérete nanoméretes tartományba esik [4]. A nanoanyagok közé tartoznak az agyagásványok [6], [7], a grafén [8] vagy a szén nanocső (CNT) [9]. A nanokompozitok előnyei közé tartozik, hogy a nanorészecskék nagy fajlagos felülettel rendelkeznek, emiatt előnyösebb tulajdonságok érhetők el, mint mikroméretű erősítés esetén. Viszont ez egyben azt is jelenti, hogy a nanorészecskék mérete és diszperziója befolyásolja az anyagjellemzőket [10]. Nem elegyedő keverékekben a nanorészecskék szelektíven az egyik fázisban vagy a fázishatáron helyezkednek el, így kompatibilizálva a keveréket [11], [12], [13], [14], [15].

Mivel előnyös tulajdonságaik ellenére a szakirodalomban csak elvétve találni PP/PE/CNT nanokompozitokat, ezért a szén nanocsövek bemutatása után először a poliolefin (PP vagy PE) bázisú nanokompozitok tulajdonságait, majd a PP/PE keverékekét, végül a PP/PE bázisú nanokompozitok tulajdonságait tekintem át.

2. Szén nanocsövek

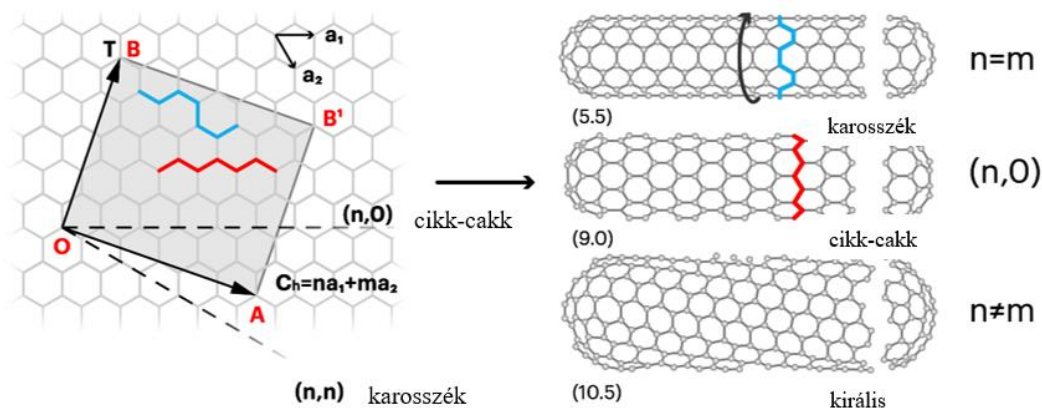
A szén nanocsöveket először egy 1889-es szabadalomban említették, mint nanoméretű fonalakat, de a transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) feltalálásáig (Siemens, 1939.) nem tudták kellőképpen megfigyelni azokat [16]. A nanoméretű fonalakról készült első TEM képet egy orosz kutatócsoport készítette 1952-ben, de a hidegháború miatt ez a felfedezés nem tudott világszinten elterjedni. Ők viszont már meg tudták állapítani, hogy ezek a „fonalak” üregesek és átmérőjük a nanométeres nagyságrendbe esik. Az akkori TEM képek nem megfelelő felbontása miatt többen is diffrakciós vizsgálatokból próbálták következtetni a szerkezetükre. A következő 40 évben is születtek tanulmányok a nanofonalakról, de átütő hatást csak Iijima Nature-ben publikált cikke ért el [17]. Sumio Iijima 1991-ben fullerén szerkezetek ívkisüléssel gyártásával foglalkozott, mikor a katódon túszerű képződményeket fedezett fel. Ezek 2-50 rétegű, grafit rétegekből feltekert koaxiális csövek voltak, vagyis többfalú szén nanocsövek (MWCNT) [17]. Egyfalú szén nanocsöveket (SWCNT) pár évvel később sikerült előállítani a csapatának, szinte párhuzamosan egy másik kutatócsoporttal. Annak az oka, hogy épp Iijima nevéhez kötjük a szén nanocsövek felfedezését, több tényezőnek is köszönhető. A tudóstársadalom addigra már megérett az addig hihetetlennek tűnő „nanoméret” elképzelésére, mivel a fulleréneket előtte pár évvel fedezték fel (1. ábra) [18]. Felfedezésével épp egy sokat kutatott problémára, a CNT növekedési mechanizmusának megértésére talált megoldást, valamint a folyóirat kiválasztásával is a kutatók nagy tömegét tudta megszólítani. A CNT azóta is az egyik legnagyobb népszerűségnek örvendő erősítőanyagnak számít.



1. ábra Különböző szénmódosulatok: fullerén, nanocső és grafén [19]

A szén nanocsövek olyan különleges szénmódosulatok, amelyben a szénatomok nagyon kis átmérőjű (1-100 nm) üreges hengert alkotnak [20]. Szerkezetük lehet egyfalú („single-walled carbon nanotube” SWCNT) vagy többfalú („multi-walled carbon nanotube” MWCNT), ennek speciális esete, ha csak kettő („double walled” DWCNT) vagy kevés („few walled” FWCNT) hengerből állnak [21], [22]. Az MWCNT

koncentrikusan elhelyezkedő hengerekből áll, ahol a hengerek közti távolság $\sim 0,34\text{nm}$, amely a grafitsíkok közti van der Waals kötési távolsággal egyezik meg [20]. A nanocső falán elhelyezkedő szénatomok szerkezetétől függően változik a kiralitás, vagyis a henger „feltekerésének” módja alapján beszélhetünk karosszék, cikk-cakk vagy királis elrendezésről (2. ábra). Ettől függ, hogy a szén nanocső vezető vagy félvezető tulajdonságokkal bír.



2. ábra Karosszék, cikkcakk és királis elrendezésű szén nanocsövek [23]

Kedvező tulajdonságainak egyik fő oka a többezerszeres hossz-átmérő arány, minek hatására a kvázi-egydimenziós nanocső végein már kis feszültség hatására is nagy elektromos térerősség képes kialakulni. Karosszék-nanocsöveknél a vezetőképesség is kiváló [20]. Kis sűrűsége ellenére szakítószilárdsága akár százszorosa is lehet a rozsdamentes acélénak. A gyakorlatban viszont csak a húzóigénybevétellel szemben mutatnak ilyen előnyös tulajdonságokat. Az egymás mellé kerülő CNT szálakból létrejött nanocső-kötegeket, illetve az MWCNT-t alkotó hengereket intermolekuláris kötések tartják egymás mellett, erőhatásra a kötegek egymáson elcsúszhatnak, valamint az MWCNT részek is szétcsúszhatnak. Hővezetőképességük tengely irányban kiváló (a réz értékének tízszeresét is elérheti), sugárirányban viszont csak ennek töredéke. A megfelelő diszperzió elérése érdekében az SWCNT kötegekbe rendeződését felületaktív anyagokkal meg kell szüntetni a mátrixanyagba való eloszlása előtt [4]. Az MWCNT kevésbé hajlamos kötegekbe rendeződni, ezért itt nem minden esetben szükséges a feldolgozás előtti kezelés.

3. Poliolefin- szén nanocső nanokompozitok

Polimer nanokompozitok alkalmazásával nemcsak a mikro- erősítőanyagokkal elérhető teljesítmény bővíthető ki, hanem teljesen új tulajdonság párosítások is elérhetőek, így olyan mérnöki megoldásokban is felhasználhatók, amelyekre eddig nem is gondoltunk [24]. További előnyük, hogy kis mennyiségben is hatásosak (1-5 m/m%), így gazdaságosabban használhatók. Hátrányuk, hogy a nanoanyag diszperziója nagymértékben befolyásolja a tulajdonságokat.

Poliolefineket egyre gyakrabban használnak szén nanocső nanokompozitok mátrix anyagaként, mivel tömegműanyagként áruk kedvező, de erősítőanyaggal műszaki területeken is felhasználhatók, valamint alacsony vízfelvételük miatt feldolgozás előtti szárítani sem szükséges [25]. Továbbá a poliamid vagy polikarbonát műanyaghoz képest alacsonyabb a felületi szabadenergiájuk, ami miatt jobb a CNT nedvesíthetősége a mátrixban [25]. Kristályossági fokuk nagy tartományban változtatható, ezért célszerű a CNT ezen értékre gyakorolt hatását vizsgálni. Viszonylag kis modulusz értékkel rendelkeznek, amely erősítőanyaggal nagymértékben növelhető az elért kristályossági foktól függően. A poliolefin-szén nanocső nanokompozitok vizsgálata viszonylag fiatal kutatási területnek számít, mivel nem volt gazdaságosan gyártható, viszont a nemrégiben megjelent innovatív CNT gyártó technológiák segítségével és új CNT gyártók megjelenésével valószínűleg az alapanyag ára is csökkenni fog majd.

A poliolefin keverékekből készült nanokompozitok hatalmas potenciállal rendelkeznek az járműipar [5], [26], [27], a repülőipar [26], az elektronika [28], [29] és az orvosi biológiai alkalmazások [30], [31] területén [32]. Két nem elegyedő, hidrofób polimer esetén, mint a PP és a PE, a megfelelő erősítőanyag kiválasztásával összeférhető keveréket kaphatunk.

A szakirodalomban számos olyan kutatás található, ahol különféle polietilén (HDPE, LDPE, LLDPE vagy UHMWPE (ultranagy molekulatömegű polietilén)) vagy izotaktikus PP mátrixú egyfalú (SWCNT) vagy

többszálú szén nanocső (MWCNT) kompozitokat vizsgálnak. Viszont csak elenyésző azoknak a száma, ahol PE/PP keverékhez adják hozzá a nanocsövet. Így az irodalomkutatásomban először a poliolefin (PE vagy PP) szén nanocső nanokompozitok, majd a PE/PP nanokompozitok tulajdonságait mutatom be.

3.1. Poliolefin- szén nanocső nanokompozitok termikus viselkedése

Polimer bázisú rendszerek termikus jellemzőit általában kalorimetrikus berendezéssel (például DSC – differenciál pásztázó kalorimetriával) vizsgálják. Részben kristályos polimereknél a kristályos fázis kialakulásának módja, mennyisége és a kialakult kristálmódosulatok is hatással vannak a makroszkopikus tulajdonságokra. A PE/CNT, illetve PP/CNT nanokompozitok termikus jellemzésére általában a második felfűtésből és a hűtésből származó paraméterek használatosak, úgy, mint az entalpiaváltozással (ΔH) arányos kristályossági fok (X_c), a kristályosodás sebessége (v_c), a kristályolvadási csúcshőmérséklet (T_{pm}), a kristályosodás extrapolált kezdeti hőmérséklete (T_{eic}) és a kristályosodási csúcshőmérséklet (T_{pc}) [33].

A kristályossági fok általában nő a CNT tartalommal [34], [35], [36], de csökkenhet is, mivel a CNT több gócpontot hoz létre, így gátolva a nagy, egységes lamellák keletkezését, továbbá növeli a szemcsehatárok számát és egyéb hibahelyeket hozhat létre [37], [38]. A 0,1 és 25 m/m% közötti CNT tartományban az X_c változás minden esetben +/-10% között volt. Általában az 1 m/m% alatti töltöttség csak kismértékű X_c csökkenést [39], [40], [41], vagy növekedést [10] okoz. 1 m/m%-os CNT tartalommal általában 5-7% X_c változás érhető el [35], [37], [40], [42], [43], míg 2-5 m/m%-nál elérheti a 8-10%-ot is [36]. A kutatások alapján nagyobb töltöttségnél (10-25 m/m%) sem érhető el nagyobb változás polietilénnek esetén [44], [45].

Mivel a szén nanocsövek gócképzőként viselkednek, ezért a keverék kristályosodási sebességét növelik [35], [39], [46], [47], [48], még 1 m/m% CNT alatt is [39]. Viszont a kristályosodási sebesség függ a töltőanyag diszperziójától, ezért általában a keverési idő növelésével nő [25]. A kristályosodási sebességnek a fizikai határa 1,5 m/m% CNT körül van, amikor már nem a gócképzés sebessége nő, hanem a kristálygócok mérete növekszik [25]. A PP/MWCNT kompozitban a kritikus dermedési pont elérése után a polimer láncok mobilitása csökken, így a PP szferolitok radiális növekedési sebessége is csökken [46].

A kristályosodás kezdeti és csúcshőmérséklete minden vizsgált esetben növekedett [43], [44], [47], [49], [50], ami azt jelenti, hogy magasabb hőmérsékleten megindult a kristályos fázis kialakulása. 1 m/m% CNT tartalom esetén 2-4 °C-al [35], [37], [42], míg 20 m/m%-nál akár 18 °C-al [51] magasabb hőmérsékleten kezdődhet a kristályosodás. Habár Battacharyya és társai kutatása során csupán 0,8 m/m% SWCNT-t keverték PP-hez, ennek ellenére 11 °C-al nőtt a csúcshőmérséklet a PP-éhez képest és a kristályosodási csúcs elkeskenyedése is a kristallitok méretének megváltozását jelezte [48].

Az olvadási csúcshőmérsékletet nem [35], vagy csak kicsit növeli a CNT [25], [34], [37], [52], [53], viszont a PP/HDPE keverékek HDPE-hez tartozó T_m -jét 6 °C-al is megemelheti 0,5 m/m% MWCNT [54]. A termikus vizsgálatok alapján a PP/MWCNT kompozitok perkolációs küszöbe, ahol összefüggő CNT háló alakul ki, 0,3 m/m% nanocső tartalomnál [42], míg a PP/HDPE keverékeknél 0,352 m/m%-nál jelentkezhet [54].

A termikus vizsgálatok eredményeiből megállapítható, hogy a CNT-nek gócképző hatása van, növeli kristályosodás sebességét, de épp ezért gátolhatja a nagyobb lamellák kialakulását. Így a kristályossági fok növekedhet, de csökkenhet is. A hatását már kis mennyiségű CNT is kifejti, nagyobb mennyiséget (10 m/m% felett) felesleges alkalmazni.

3.2. Poliolefin- szén nanocső nanokompozitok hőstabilitása

A kompozitok hőstabilitását általában termogravimetrikus analízissel vizsgáljuk. Feldolgozás szempontjából az 1, 3 és 5% elbomlott anyagmennyiség hőmérsékletét ($T_{1\%}$, $T_{3\%}$, $T_{5\%}$) érdemes ismerni, mivel ezeket a hőmérsékleteket nem szabad elérnünk. Szabvány szerint a bomlási lépcsőn meghatározzák az extrapolált kezdeti (T_A) és vég hőmérsékletet is (T_B), de előbbi hasonló értékkel szolgál, mint a $T_{5\%}$, viszont a görbe kezdeti meredeksége befolyásolja [37]. A bomlási lépcső inflexiós pontjával (T_C), avagy a derivált görbe maximumával megadható a bomlás maximális sebességénél mért hőmérséklet (T_{max}).

CNT hozzáadásával a poliolefinnek fenti értékei minden vizsgált esetben nőnek, égésgátlása jobb a hasonló körülmények között alkalmazott agyagásványnál [55], [56], és grafén nanolemeznél (GNP) is [57]. A poliolefinnek közül PE mátrixban hatékonyabban fejti ki hatását, mint PP-ben [7]. A kompatibilizálást szolgáló funkcionizáló kezelés befolyásolja a CNT hatékonyságát [25]. Továbbá az egy lépéses funkcionizálás kedvezőbb égésgátlás szempontjából a kétlépésessel szemben [58]. Nitrogén atmoszférában a T_{max} általában csak 10-20 °C-al emelkedik 0,5-3 m/m% MWCNT tartalom esetén [10], [36], [59], [60], [61], [62], míg

oxigénben és levegőben akár 100 °C-os emelkedést is tapasztalhatunk [59], [60]. Kodjie és társai nitrogénben 70 °C-al, míg levegőben 115 °C-al tudták növelni a T_{max} értékét, amikor HDPE-1 m/m% SWCNT oldatból készítettek keveréket [37]. Azonban nagyobb CNT koncentrációval sem érték el nagyobb hőmérsékletváltozást, ami azzal magyarázható, hogy addigra kialakult a CNT perkolációs háló. Pöllänen és társainak nagyobb mennyiségű, 6% CNT-vel sem sikerült 10 °C-nál jobban növelni a HDPE- maleinsav-anhidrid oltott polietilén (PEgMA) bomlási hőmérsékletét [52]. A $T_{5\%}$ értéke viszont javítható további CNT adagolásával, - akár 30-60 °C-al [36], [60], [62], [63] -, mert a CNT meggátolja a polimer égéstermékek gáz fázisba kerülését és csökkenti a polimer láncok mobilitását. Mivel ezáltal a T_{max} és $T_{5\%}$ közti hőmérsékletkülönbség lecsökken, a tömegváltozás-hőmérséklet görbe meredekebb lesz, a bomlás megindulása után a CNT „felgyorsítja” a degradációt [37], [62].

A szakirodalom alapján elmondható, hogy a CNT égésgátló hatása bizonyított, oxidatív környezetben viszont sokkal hatásosabb, mint inert atmoszférában. Viszont az összekapcsolt CNT-háló kialakulása után már nem nő relevánsan, ezért elég kis mennyiségű CNT alkalmazása.

3.3. Poliolefin- szén nanocső nanokompozitok mechanikai jellemzői

A mechanikai vizsgálatok közül a szén nanocsöveknek leggyakrabban a húzóigénybevétellel, esetleg hajlító- és ütőigénybevétellel szembeni ellenállását vizsgálták [29], [42], [64]. A húzóvizsgálat során a rugalmassági (Young) modulusz és a szakítószilárdság növekvő értéke mutatja, hogy a CNT hatására egy rendezettebb kristályszerkezet jön létre [5], [29], [65], [66]. Nagy CNT koncentrációnál a kialakult agglomerátumok csökkenthetik a fenti értékeket [25]. A szakítószilárdság általában 18-65%-al nő, míg a modulusz értéke nagyobb mértékben, akár 50-100%-al is nőhet 0,5-3 m/m% CNT esetén [35], [42], [43], [57]. Többen bizonyították, hogy nagyobb (10-20 m/m%) CNT koncentráció mellett jelentős javulás érhető el [21], [67]. Kutatásukban a PE/MWCNT kompozitoknál folyamatosan növekedett a szakítószilárdság [21], [25], viszont a 90/10 PP/PE keverékeknél csak 10% CNT tartalom felett tapasztalható nagyobb változás [21].

A szakadási nyúlás általában csökken a nanokompozitoknál, mert a CNT által merevített szerkezet kevésbé képes megnyúlni, a nyakképződés eltűnik. Viszont kis mennyiségű, megfelelően diszpergált CNT növelheti a PP, illetve UHMWPE szakadási nyúlását [68], [69]. Mások LLDPE nyúlását növelték 134,6%-al 3 m/m% CNT-vel [35]. Bhuiyan és társai bizonyították, hogy a nyúlás a CNT szálak átmérőjével arányosan nő, viszont mennyiségével arányosan csökken [10]. A szakítószilárdság és a nyúlás együttes csökkenése a polimer-CNT határfelület gyengeségére utalhat [44].

A kompozitok, így a nanokompozitok is érzékenyek a dinamikus (ütő)igénybevételekre, mert az anyagban található bármely egyenetlenség repedés képződéséhez vezethet. Már 1 m/m% CNT koncentráció esetén megfigyelhető kismértékű (15%) csökkenés a PP keverékeknél [42], de kismértékű (~12%) javulás is a PE keverékeknél [64]. PP keverékeknél a nem kezelt MWCNT nagyon kis koncentrációban (0,01 m/m%-ban) 13,8% növekedést eredményez, de amint növeljük a mennyiséget, azonnal csökken az ütőmunka [68]. 1 m/m% funkcionális MWCNT-vel nagyobb mértékű javulás érhető el (152%), mintha PP-g-MA-hez kevernénk (69%). Nagyobb mennyiségűnél (2 m/m%) viszont kevésbé diszpergálható a CNT, így az értékek csökkenni kezdenek.

MWCNT hozzáadásával PP/EPDM kompozitok ütőszilárdsága is növelhető [70]. Többféle keverési sorrend közül akkor érték el a legnagyobb változást (38-ról 112,5 kJ/m²), amikor a CNT-t közvetlenül az EPDM után adagolták a belső keverőbe. A PP mátrixba bekeveredő CNT indukálta a PP szferolitok méretnövekedését és erősítette a köztük lévő kölcsönhatást, míg a határfelületre kerülő részecskék erős PP-EPDM kapcsolatot alakítottak ki. Ezen kívül a kisméretű MWCNT aggregátumok elcsúsztották a törési utat, ezzel növelve az ütőmunkát.

A szakirodalom alapján a húzási tulajdonságok jelentős javításához szükséges a nagyobb mennyiségű (10-20 m/m%) CNT, viszont alacsonyabb értékeknél is tapasztalható növekedés. Az ütőmunka minimális CNT-vel javítható, de a CNT koncentráció növelésével drasztikusan csökken.

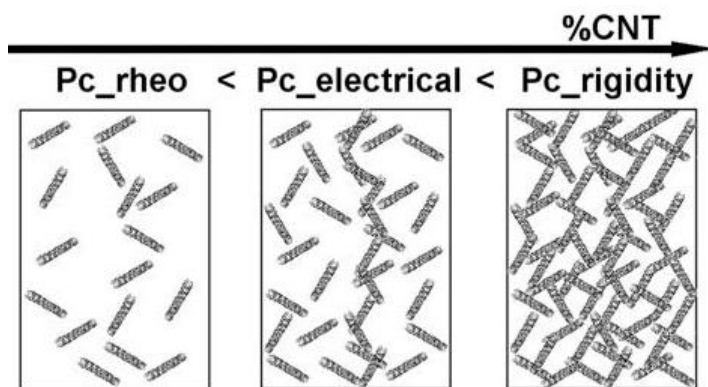
3.4. Poliolefin- szén nanocső nanokompozitok reológiai viselkedése

Polimer mátrixú kompozitok feldolgozásához elengedhetetlen az anyagok reológiai viselkedésének ismerete. A feldolgozás alapját képezi, hogy milyen a polimer ömledék folyóképessége egy adott hőmérsékleten, milyen mértékben alakítható. Az anyag folyóképességét a viszkozitás jellemzi (η), amely a nyírófeszültség és a deformációsebesség hányadosával írható le. Bármilyen reométerrel is mérünk, a viszkozitást általában meg

tudjuk vele határozni. Az ún. rotációs reométereknél már olyan komplex anyagjellemzők is meghatározhatók, mint például a komplex modulusz (G^*) és komponensei: a tárolási (G') és veszteségi modulusz (G''), amelyekkel következtetni tudunk az ömledék molekulaszervezetére, szerkezeti átalakulásaira.

A CNT- nek általában komplex viszkozitás-növelő hatása van [42], [71], [72], [73], de bizonyos, ömledékben lejátszódó mechanizmusok miatt előfordulhat az ellenkezője is [67], [74]. Például kis mennyiségű CNT csúsztatóként funkcionál HDPE-ben, ezért csökkenhet a komplex viszkozitása [75]. A viszkozitás akkor is csökkenhet, ha nagyon nagy molekulatömeg-eloszlású a mátrix anyag (vagy bimodális), mivel a CNT felületére szelektíven a nagy molekulatömegű frakció diffundál, így a szabadon álló mátrix anyag elágazássűrűsége és relaxációs ideje is csökken [25].

Alacsony CNT tartalomnál általában megjelenik alacsony deformációsebességnél a newtoni plató, ami azt jelenti, hogy az ömledék folyadékszerűen, viszkózan viselkedik. Egy határérték felett ez a viselkedés átalakul szilárdszerű, elasztikus viselkedéssé [67], [72]. Ez a határérték, ahol a newtoni plató eltűnik, az egyes kutatásokban eltérő: 0,5 és 4,8 m/m% közötti értékeket határoztak meg [67] [72] [76] [77] [78], [79]. Kis CNT tartalomnál csak polimer-polimer és polimer-CNT kölcsönhatások jönnek létre, mert kinetikailag nem valószínű, hogy a kevés nanorészecske találkozzon egymással. Egy kritikus CNT tartalom felett viszont megjelennek a CNT-CNT kölcsönhatások is, a CNT részecskék összekapcsolt hálót alkotnak, ez a perkolációs küszöb[80]. Attól függően, hogy a létrejött CNT-háló milyen tulajdonságváltozást okoz, beszélhetünk reológiai, elektromos vagy szilárd perkolációs küszöbről (3.ábra).



3. ábra A különböző perkolációs küszöbök kialakulása a CNT tartalom függvényében [80]

A reológiai perkolációs küszöb alacsonyabb CNT koncentrációnál is kialakul, mint az elektromos, mivel az ömledék folyóképeséget úgy is megváltoztatják a nanocsövek, ha nem alkotnak teljesen összekapcsolódó hálót. Ezzel szemben az elektromos perkoláció esetén a CNT részecskék között elektromos vezetésnek kell kialakulni. A szilárd perkolációs küszöb egy makroszkopikus szerkezet kialakítását feltételezi, amely a környező polimer mátrix esetleges eltávolítása után is megmaradna. Reológiai megközelítésből a perkolációs küszöbnél gélesedési folyamat játszódik le, ennek határértéke a CNT hossz-átmérő arányával nő [46]. Többen is azt találták, hogy a perkolációs küszöbérték felett a tárolási modulusz kis frekvencián frekvenciafüggetlen, a görbe platóban kezdődik, mivel a CNT háló akadályozza a polimer láncok mozgását [44], [72]. Általában a tárolási és veszteségi modulusz értékét is növeli a CNT [42], viszont a tanδ értékét csökkenti [46], [67]. Kis frekvencián a tanδ görbénél is plató jelentkezik, sőt kismértékű növekedés is látható az elasztikus viselkedést tükrözve [46].

Ezen eredmények arra engednek következtetni, hogy a kompozit viszkozitása függ a polimer-CNT kölcsönhatás mértékétől, valamint az alapanyag típusa és szerkezete befolyásolja a reológiai perkolációs küszöbhez szükséges CNT mennyiséget.

4. PP/PE keverékek viselkedése

A PE és PP kereskedelme világszinten meghatározza a műanyagpiacot, de sajnos nem biodegradálhatók, ezért csak újrahasznosítással csökkenthetjük a belőlük képződött hulladékot. A leggazdaságosabb és leggyorsabb megoldás az lenne, ha a PP és PE műanyagok keverékeit használnánk fel. Nem csak a hulladékgazdálkodás ösztönzésére, hanem új, előnyös tulajdonságú anyagkeverékek fejlesztésére is alkalmasak lehetnek [32]. A PE javítja a PP ütőmunkáját és hidegállóságát, viszont nem változtatja meg a PP szerkezetét. Előfordulhat, hogy

a HDPE szferolitok növekedése miatt a PP szferolitok kisebbek lesznek [81]. A PP és a PE termodinamikailag nem elegyednek, ezért elegyítésükkel egy többfázisú rendszert kapunk, amihez egy harmadik összetevőt adva kompatibilizálhatjuk, összeférhetővé tehetjük őket. Az alkalmazott PP és PE szerkezete minél inkább hasonlít egymásra, annál nagyobb szinergizmus érhető el a tulajdonságokban [82]. A PP lineáris szerkezetű, ezért az LDPE-vel nem keverhető, az LLDPE-vel is csak kismértékű szinergizmus tapasztalható [82]. Az izotaktikus polipropilén (iPP)/HDPE keverékeknél kapjuk a legjobb szakítószilárdság értékeket, mivel erős határfelületi kölcsönhatás jön létre, de ott is csak bizonyos összetételeknél [83], [84], [85]. Például a 20m/m% HDPE megnöveli az iPP húzófeszültségét és modulusz értékét, mivel a HDPE ömledék befolyik a PP szferolitok közé és ott gócképzőként hat a PP kristályosodásakor [32].

Nem elegyedő keverékek kompatibilizálásához gyakran alkalmaznak szén nanocsövet, amely szelektíven az egyik fázisba diffundál vagy a fázishatáron helyezkedik el, növelve a határfelületi adhéziót [12], [15], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93]. A szakirodalom alapján elmondható, hogy a CNT (egyik fázisban vagy fázishatáron történő) szelektív elhelyezkedésében nagy fejlesztési potenciál rejlik. Néhány kutatás már foglalkozott a PE/PP nanokompozitok tulajdonságaival, ezeket mutatom be a következő fejezetben.

5. PP/PE nanokompozitok viselkedése

Különböző nanoanyagok PP/HDPE keverékekre gyakorolt hatását már többen vizsgálták, például halloysit agyagásvány, szénszál [14], montmorillonit agyagásvány (MMT) [7], grafén nanolemezek (GNP) [8], korom [94], [95] vagy szén nanocső (CNT) alkalmazásával [83], [96].

A PP/HDPE/korom kompozitokban a HDPE és a szén felülete között erős kapcsolat alakul ki, minek eredményeképpen nem csak szabad PP és HDPE domének, de HDPE-korom komplex domének is megjelennek a keverékben [97]. A kompozitok szerkezetét az alapanyagok aránya és tulajdonságai határozzák meg. A szabad HDPE domének térfogatát és szerkezetét befolyásolja a HDPE és a korom aránya, a korom szerkezete és a PP viszkozitása. Kis HDPE tartalomnál (10% alatt) a szabad HDPE domének eltűnnek és az összes HDPE a korom felületén oszlik el. Viszont ezt a korom n-dibutil-ftalát (DBP) adszorpciós száma is befolyásolja. Növelésével csökken a szabad HDPE domének térfogata. A PP viszkozitásának növelésével a HDPE-korom komplexek szeparálódnak, nem alakul ki közöttük összefüggő háló, viszont csökken a kettős folytonos szerkezet kialakulásához szükséges HDPE tartalom. A nanokompozitok elektromosan vezető tulajdonságokat is mutathatnak a korom részecskék vezető hálóbba rendeződése miatt. A HDPE tartalom csökkentésével és a PP viszkozitásának növelésével növelhető az elektromos ellenállás is.

Fröccsöntés során a fázisok orientálódnak a folyás irányába és a PP és PE fázisok párhuzamosan, alternálva helyezkednek el [97], [98].

A PP/HDPE keverékek kompatibilitása EPDM-mel javítható, egymásba hatoló komplex morfológia jön létre, amely eredményeképp az ütőmunka és a nyúlási értékek is nőnek, a tárolási és veszteségi modulusz viszont csökken, ami GNP hozzáadásával kompenzálható [96]. A GNP hatására a kompozitok kristályos hányada is nő, de a karakterisztikus hőmérsékletek nem változnak.

Az 50/50 és 90/10m/m% PP/PE keverékeknél 5 v/v% nanoadalék (GNP és CNT különböző százaléku arányában) hatására javulhatnak az elektromos, EMI (elektromágneses interferencia) védelem és mechanikai tulajdonságok [8]. A nanoadalékban a GNP és CNT arány csökkenésével nő a szakítószilárdság, mivel a PE adhéziója jobb a CNT-vel, mint a GNP-vel és a CNT egydimenziós szerkezete is kedvezőbb, mint a kétdimenziós GNP-é.

A 90/10 m/m% PP/PE keverékek szakítószilárdsága csak 10 m/m% CNT tartalom fölött nő jelentősen, 20%-nál 1,7-szer nagyobb, mint a töltetlen keveréké, szívósságát viszont csökkenti 3 MJ/m³-ról 1,8-ra [21]. Ez annak köszönhető, hogy a PE/CNT fázis szilárdsága nő, a PP és PE/CNT fázisok határfelületén pedig jó adhézió alakul ki. A PP/HDPE/CNT nanokompozitok elektromos perkolációs hálójára már 1 m/m% CNT-nél kialakulhat. Sőt, ennek minimális értéke akár 0,352 m/m% is lehet [54].

PP/HDPE/MWCNT (70/30m/m%) nanokompozitok termikus tulajdonságai javíthatók már 0,5 m/m% CNT hozzáadásával [54]. A bomlási hőmérsékletet 426-ról 433 °C-ra növelte, az olvadási csúcsok közül a PP-é nem változott, a HDPE csúcs hőmérsékletét 6 °C-al emelte meg.

A CNT, korom, rövid szénszál (CF), GNP affinitása nagyobb a PE fázis felé, ezért minden esetben abban helyezkedik el [8], [14], [97], [98]. Akkor is, ha PP/MWCNT mesterkeverékből történő hígítással történt a keverékkészítés [99]. Amennyiben nagy CNT tartalom (20 m/m%) és kis HDPE tartalom (max. 10 m/m%) miatt telítődik a PE fázis, úgy a PP-be is bediffundál [21]. Annyi a különbség a PE vagy PP bázisú MWCNT

mesterkeverékből készült keverékek között, hogy a PE-nél a domének mérete csökken, míg a PP-nél az összeolvadások miatt a domének mérete nő [99].

PP/HDPE/(1, 2 és 3 m/m%) MWCNT tartalmú nanokompozitoknál a CNT porból, illetve PP bázisú 20 m/m%-os MWCNT mesterkeverékből készült minták közötti különbségek a következők: [100] A nanokompozitok nyíróviszkozitása és elektromos vezetése hasonlóan alakul. A direkt keveréses mintáknál jobb a CNT diszperziója, mivel a PP mesterkeverék és a PP/HDPE keverék nem alkot homogén elegyet. A szabad PP domének csillapító hatással rendelkeznek, ezért a mesterkeverékből készült minták elasztikusabban viselkednek. Nagy CNT koncentrációnál a mesterkeverékkel jobb diszperzió érhető el, apró CNT agglomerátumokkal. Kis CNT koncentrációnál a hidrodinamikus hatás érvényesül, a részecskék között nincs kapcsolat, csak a nanocső-polimer kölcsönhatás miatt tapasztalható javulás.

A szén nanocső hatására kettős folytonos szerkezet alakulhat ki, mivel a CNT meggátolja a fázisinverziót [54], [99]. Ezáltal dupla perkoláció jön létre, amely feltétele az erősítőanyag perkolációja a HDPE fázisban, majd a keverékben a kettős folytonos szerkezet kialakulása [14]. A perkolációs küszöböt csökkenti az MWCNT (0,5-3 m/m%-ban) a PP/EOC (etilén-oktén kopolimer) keverékekben is, ahol a PP kompatibilizációját maleinsav anhidriddel (PP-g-MA) és (amino-metil)-piridinnel (PP-g-Py) való módosítás segítette a határfelületi feszültség eltolásával [101]. A PP és MWCNT előkeverése esetén az EOC hozzáadásánál a nanorészecskék migrációja már 2 perc után megtörténik az EOC fázisba.

A PE/PP nanokompozitok szakirodalmi áttekintése után megállapítható, hogy a nanoanyag általában a PE fázisban helyezkedik el, valamint, hogy sikeresen javítja a két polimer összeférhetőségét. Habár a talált kutatási eredmények alapján a szén nanocső pozitív hatással van a keverékek viselkedésére, csak elvétve találni a témában irodalmat, pedig rengeteg alkalmazási területen jelenthetne megoldást a felhasználásuk.

6. Következtetések

Sokat kutatott téma a poliolefin (főleg PP) bázisú szén nanocső nanokompozitok tulajdonságai. A nanokompozitok erősítőanyag tartalma általában 0,5-5 m/m% közötti, de elvétve találni 0,1 vagy éppen 20%-os töltöttséget is. A PP alapanyaghoz a szén nanocsövet leggyakrabban por alakban keverik az ömledékhez és a kellő polimer-CNT kölcsönhatás eléréséhez a CNT felületét előtte kezelik, funkcionálják. Ez a módszer sokkal időigényesebb és drágább, mint mesterkeverékből elkészíteni a kompozitot, viszont a CNT nem megfelelő diszperziója a tulajdonságok (termikus, mechanikai) változását vonhatja maga után.

A polipropilén alkalmazhatóságának kiterjesztéséhez gyakran keverik polietilénnel, így hidegállóbb és rugalmasabb alkatrész készíthető. Habár PE vagy PP bázisú nanokompozitból rengeteg szakirodalmat találni, a PE/PP keverékbázisú nanokompozitokról csak elvétve találni információt. A talált irodalmak kedvező tulajdonságokról számolnak be a nanocső hozzáadásával, viszont ezen kompozitok jellemzői közül főleg az elektromos vezetésre és EMI (elektromágneses interferencia) védelemre koncentrálnak. A mechanikai, termikus vagy reológiai vizsgálatukra csupán 1-1 példát találtam. Pedig ezen tulajdonságok ismerete elengedhetetlen a mérnöki tervezéshez, hogy meg lehessen határozni a feldolgozási paramétereket és az elkészült termék alkalmazhatóságát.

Irodalomjegyzék

- [1] D. Feldman, "Polyolefin, olefin copolymers and polyolefin polyblend nanocomposites," *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, vol. 53, no. 10, pp. 651–658, Oct. 2016, doi: 10.1080/10601325.2016.1212313.
- [2] D. W. Posch, "Polyolefins," in *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition*, Elsevier Inc., 2016, pp. 27–52. doi: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00002-X.
- [3] Szakács Hajnalka, "Műanyag kompozitok-1. rész," 2012. Accessed: Dec. 17, 2025. [Online]. Available: <http://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/2924>
- [4] Varga Csilla, "Műanyag kompozitok-2. rész," 2012. Accessed: Dec. 17, 2025. [Online]. Available: <http://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/3176>
- [5] C. Okolo, R. Rafique, S. S. Iqbal, M. S. Saharudin, and F. Inam, "Carbon nanotube reinforced high density polyethylene materials for offshore sheathing applications," *Molecules*, vol. 25, no. 13, Jul. 2020, doi: 10.3390/molecules25132960.
- [6] D. Nagy and E. Kókai, "Polymer-based nanocomposites with nanoclay," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 448, no. 1, Nov. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/448/1/012021.
- [7] S. Atharangsang and S. Saikrasun, "Comparative performance of carbon nanotube and organo montmorillonite as a thermo-oxidative-stabilizing modifier for polypropylene- and polyethylene-based thermoplastic composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 28, no. 10, pp. 1423–1444, Oct. 2015, doi: 10.1177/0892705713513284.
- [8] M. H. Al-Saleh, "Electrical, EMI shielding and tensile properties of PP/PE blends filled with GNP:CNT hybrid nanofiller," *Synth Met*, vol. 217, pp. 322–330, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.synthmet.2016.04.023.

- [9] A. Bata, D. Nagy, and Z. Weltsch, "Effect of Recycling on the Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 14, 2022, doi: 10.3390/polym14235257.
- [10] M. K. H. Bhuiyan, M. M. Rahman, M. F. Mina, M. R. Islam, M. A. Gafur, and A. Begum, "Crystalline morphology and properties of multi-walled carbon nanotube filled isotactic polypropylene nanocomposites: Influence of filler size and loading," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 52, pp. 70–79, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.05.011.
- [11] A. Taguet, P. Cassagnau, and J. M. Lopez-Cuesta, "Structuration, selective dispersion and compatibilizing effect of (nano)fillers in polymer blends," *Prog Polym Sci*, vol. 39, no. 8, pp. 1526–1563, 2014, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2014.04.002.
- [12] D. Wu, Y. Zhang, M. Zhang, and W. Yu, "Selective localization of multiwalled carbon nanotubes in poly(ϵ -caprolactone)/polylactide blend," *Biomacromolecules*, vol. 10, no. 2, pp. 417–424, Feb. 2009, doi: 10.1021/bm801183f.
- [13] T. Gong *et al.*, "Selective distribution and migration of carbon nanotubes enhanced electrical and mechanical performances in polyolefin elastomers," *Polymer (Guildf)*, vol. 110, pp. 1–11, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.polymer.2016.12.056.
- [14] C. Zhang, X. S. Yi, H. Yui, S. Asai, and M. Sumita, "Selective location and double percolation of short carbon fiber filled polymer blends: high-density polyethylenoisotactic polypropylene," *Mater Lett*, vol. 36, pp. 186–190, 1998.
- [15] Y. Y. Shi, J. H. Yang, T. Huang, N. Zhang, C. Chen, and Y. Wang, "Selective localization of carbon nanotubes at the interface of Poly(L-lactide)/Ethylene-co-vinyl Acetate resulting in lowered electrical resistivity," *Compos B Eng*, vol. 55, pp. 463–469, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.07.012.
- [16] M. Monthioux and V. L. Kuznetsov, "Who should be given the credit for the discovery of carbon nanotubes?," *Carbon N Y*, vol. 44, no. 9, pp. 1621–1623, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.carbon.2006.03.019.
- [17] Iijima Sumio, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, Nov. 1991.
- [18] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, "C₆₀: Buckminsterfullerene," *Nature*, vol. 318, no. 6042, pp. 162–163, 1985, doi: 10.1038/318162a0.
- [19] Kate Flowers, "Reflecting on the Impacts of Science: Nanotechnology." Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://library.scotch.wa.edu.au/sciences/year9/nanotechnology/nanotubes>
- [20] J. Kürti, "Szén nanocsővek," *FIZIKAI SZEMLE*, vol. 57, pp. 106–108, 2007.
- [21] M. H. Al-Saleh, "Carbon nanotube-filled polypropylene/polyethylene blends: compatibilization and electrical properties," *Polymer Bulletin*, vol. 73, no. 4, pp. 975–987, Apr. 2016, doi: 10.1007/s00289-015-1530-1.
- [22] N. A. Kumar, I.-Y. Jeon, G.-J. Sohn, R. Jain, S. Kumar, and J.-B. Baek, "Highly Conducting and Flexible Few-Walled Carbon Nanotube Thin Film," *ACS Nano*, vol. 5, no. 3, pp. 2324–2331, Mar. 2011, doi: 10.1021/nn103630y.
- [23] Marina Filchakova, "What are multi walled carbon nanotubes? MWCNT production, properties, and applications." Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://tuball.com/fr/articles/multi-walled-carbon-nanotubes>
- [24] K. I. Winey and R. A. Vaia, "Polymer Nanocomposites," *MRS Bull*, vol. 32, no. 4, pp. 314–322, 2007, [Online]. Available: www.mrs.org/bulletin
- [25] M. Morcom and G. Simon, "Polyolefin-carbon nanotube composites," *Polymer-Carbon Nanotube Composites: Preparation, Properties and Applications*, pp. 511–544, 2011, doi: 10.1533/9780857091390.2.511.
- [26] A. Graziano, C. Garcia, S. Jaffer, J. Tjong, and M. Sain, "Novel functional graphene and its thermodynamic interfacial localization in biphasic polyolefin systems for advanced lightweight applications," *Compos Sci Technol*, vol. 188, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107958.
- [27] T. O. Salawudeen, A. M. Suleyman, F. Yusof, and M. O. Aremu, "Mechanical Properties and Morphological Characteristics of Polypropylene Ternary Nanocomposite (PP-LS-MWCNT) for Industrial Applications," *Chemical and Process Engineering Research*, vol. 8, pp. 12–20, 2013, [Online]. Available: www.iiste.org
- [28] G. D. Liang and S. C. Tjong, "Electrical properties of low-density polyethylene/multiwalled carbon nanotube nanocomposites," *Mater Chem Phys*, vol. 100, no. 1, pp. 132–137, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.matchemphys.2005.12.021.
- [29] C. A. Ramírez-Herrera, M. M. Tellez-Cruz, J. Pérez-González, O. Solorza-Feria, A. Flores-Vela, and J. G. Cabañas-Moreno, "Enhanced mechanical properties and corrosion behavior of polypropylene/multi-walled carbon nanotubes/carbon nanofibers nanocomposites for application in bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 51, pp. 26110–26125, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.125.
- [30] A. Gopanna, K. P. Rajan, S. P. Thomas, and M. Chavali, "Polyethylene and polypropylene matrix composites for biomedical applications," *Materials for Biomedical Engineering: Thermoset and Thermoplastic Polymers*, pp. 175–216, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-816874-5.00006-2.
- [31] O. K. Abubakre *et al.*, "Carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites for sustainable biomedical applications: A review," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 8, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100557.
- [32] A. Graziano, S. Jaffer, and M. Sain, "Review on modification strategies of polyethylene/polypropylene immiscible thermoplastic polymer blends for enhancing their mechanical behavior," *Journal of Elastomers and Plastics*, vol. 51, no. 4, pp. 291–336, Jun. 2019, doi: 10.1177/0095244318783806.
- [33] G. Ehrenstein, G. Riedel, and P. Trawiel, *Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice*. Hanser, 2004. Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.hanserpublications.com/Products/236-thermal-analysis-of-plastics.aspx>
- [34] J. Aalaie, A. Rahmatpour, and S. Maghami, "Preparation and characterization of linear low density polyethylene/carbon nanotube nanocomposites," *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, vol. 46, no. 5, pp. 877–889, Sep. 2007, doi: 10.1080/00222340701389100.
- [35] S. Shi *et al.*, "Remarkably Strengthened microinjection molded linear low-density polyethylene (LLDPE) via multi-walled carbon nanotubes derived nanohybrid shish-kebab structure," *Compos B Eng*, vol. 167, pp. 362–369, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.007.
- [36] D. Tabuani, W. Granelli, G. Camino, and M. Claes, "Polypropylene based carbon nanotubes composites: structure and properties," *e-Polymers*, vol. 103, no. 103, pp. 1–12, 2007, [Online]. Available: <http://www.e-polymers.org>
- [37] S. L. Kodjie, L. Li, B. Li, W. Cai, C. Y. Li, and M. Keating, "Morphology and crystallization behavior of HDPE/CNT nanocomposite," *J Macromol Sci Phys*, vol. 45 B, no. 2, pp. 231–245, Mar. 2006, doi: 10.1080/00222340500522299.

- [38] M. V. Jose, D. Dean, J. Tyner, G. Price, and E. Nyairo, "Polypropylene/carbon nanotube nanocomposite fibers: Process-morphology- property relationships," *J Appl Polym Sci*, vol. 103, no. 6, pp. 3844–3850, Mar. 2007, doi: 10.1002/app.25475.
- [39] M. A. L. Manchado, L. Valentini, J. Biagiotti, and J. M. Kenny, "Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotubes-polypropylene composites prepared by melt processing," *Carbon N Y*, vol. 43, no. 7, pp. 1499–1505, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.carbon.2005.01.031.
- [40] S. P. Bao and S. C. Tjong, "Mechanical behaviors of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites: The effects of loading rate and temperature," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 508–516, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.08.050.
- [41] J. F. Vega *et al.*, "Rheology, processing, tensile properties, and crystallization of polyethylene/carbon nanotube nanocomposites," *Macromolecules*, vol. 42, no. 13, pp. 4719–4727, Jul. 2009, doi: 10.1021/ma900645f.
- [42] S. H. Yetgin, "Effect of multi walled carbon nanotube on mechanical, thermal and rheological properties of polypropylene," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4725–4735, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.018.
- [43] F. A. He and L. M. Zhang, "Preparation of multi-walled carbon nanotubes/high density polyethylene composites with enhanced properties by using a master batch method," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 29, no. 9_suppl, pp. S644–S654, Nov. 2021, doi: 10.1177/09673911211017855.
- [44] T. McNally *et al.*, "Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites," *Polymer (Guildf)*, vol. 46, no. 19 SPEC. ISS., pp. 8222–8232, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.polymer.2005.06.094.
- [45] R. Haggenueller, C. Guthy, J. R. Lukes, J. E. Fischer, and K. I. Winey, "Single wall carbon nanotube/polyethylene nanocomposites: Thermal and electrical conductivity," *Macromolecules*, vol. 40, no. 7, pp. 2417–2421, Apr. 2007, doi: 10.1021/ma0615046.
- [46] D. Xu and Z. Wang, "Role of multi-wall carbon nanotube network in composites to crystallization of isotactic polypropylene matrix," *Polymer (Guildf)*, vol. 49, no. 1, pp. 330–338, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.polymer.2007.11.041.
- [47] J. Z. Liang, T. Y. Zhou, and S. Y. Zou, "Non-isothermal crystallization properties of polypropylene composites filled with multi-walled carbon nanotubes," *Polym Test*, vol. 55, pp. 184–189, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.09.002.
- [48] A. R. Bhattacharyya *et al.*, "Crystallization and orientation studies in polypropylene/single wall carbon nanotube composite," *Polymer (Guildf)*, vol. 44, no. 8, pp. 2373–2377, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0032-3861(03)00073-9.
- [49] K. Jeon, L. Lumata, T. Tokumoto, E. Steven, J. Brooks, and R. G. Alamo, "Low electrical conductivity threshold and crystalline morphology of single-walled carbon nanotubes - high density polyethylene nanocomposites characterized by SEM, Raman spectroscopy and AFM," *Polymer (Guildf)*, vol. 48, no. 16, pp. 4751–4764, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.polymer.2007.05.078.
- [50] A. Funck and W. Kaminsky, "Polypropylene carbon nanotube composites by in situ polymerization," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 5, pp. 906–915, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.01.034.
- [51] L. Valentini, J. Biagiotti, J. M. Kenny, and S. Santucci, "Morphological characterization of single-walled carbon nanotubes-PP composites," *Compos Sci Technol*, vol. 63, no. 8, pp. 1149–1153, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00036-8.
- [52] M. Pöllänen, S. Pirinen, M. Suvanto, and T. T. Pakkanen, "Influence of carbon nanotube-polymeric compatibilizer masterbatches on morphological, thermal, mechanical, and tribological properties of polyethylene," *Compos Sci Technol*, vol. 71, no. 10, pp. 1353–1360, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2011.05.009.
- [53] V. Causin, B. X. Yang, C. Marega, S. H. Goh, and A. Marigo, "Nucleation, structure and lamellar morphology of isotactic polypropylene filled with polypropylene-grafted multiwalled carbon nanotubes," *Eur Polym J*, vol. 45, no. 8, pp. 2155–2163, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2009.05.026.
- [54] N. A. Bhagat, N. K. Shrivastava, S. Suin, S. Maiti, and B. B. Khatua, "Development of electrical conductivity in PP/HDPE/MWCNT nanocomposite by melt mixing at very low loading of MWCNT," *Polym Compos*, vol. 34, no. 5, pp. 787–798, May 2013, doi: 10.1002/pc.22491.
- [55] G. Beyer, "Filler blend of carbon nanotubes and organoclays with improved char as a new flame retardant system for polymers and cable applications," *Fire Mater*, vol. 29, no. 2, pp. 61–69, Mar. 2005, doi: 10.1002/fam.866.
- [56] K. Chrissafis, K. M. Paraskevopoulos, I. Tsiaoussis, and D. Bikiaris, "Comparative study of the effect of different nanoparticles on the mechanical properties, permeability, and thermal degradation mechanism of HDPE," *J Appl Polym Sci*, vol. 114, no. 3, pp. 1606–1618, Nov. 2009, doi: 10.1002/app.30750.
- [57] M. El Achaby and A. Qaiss, "Processing and properties of polyethylene reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes," *Mater Des*, vol. 44, pp. 81–89, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.065.
- [58] X. Shi, J. Wang, B. Jiang, and Y. Yang, "Hindered phenol grafted carbon nanotubes for enhanced thermal oxidative stability of polyethylene," *Polymer (Guildf)*, vol. 54, no. 3, pp. 1167–1176, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.polymer.2012.12.062.
- [59] S. Bocchini, A. Frache, G. Camino, and M. Claes, "Polyethylene thermal oxidative stabilisation in carbon nanotubes based nanocomposites," *Eur Polym J*, vol. 43, no. 8, pp. 3222–3235, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.05.012.
- [60] B. B. Marosfői, A. Szabó, Gy. Marosi, D. Tabuani, G. Camino, and S. Pagliari, "Thermal and spectroscopic characterization of polypropylene-carbon nanotube composites," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 86, no. 3, pp. 669–673, 2006. DOI: [10.3390/ma3042884](https://doi.org/10.3390/ma3042884)
- [61] G. Gorrasi, M. Sarno, A. Di Bartolomeo, D. Sannino, P. Ciambelli, and V. Vittoria, "Incorporation of carbon nanotubes into polyethylene by high energy ball milling: Morphology and physical properties," *J Polym Sci B Polym Phys*, vol. 45, no. 5, pp. 597–606, Mar. 2007, doi: 10.1002/polb.21070.
- [62] S. Li *et al.*, "Structure and properties of multi-walled carbon nanotubes/polyethylene nanocomposites synthesized by in situ polymerization with supported Cp 2ZrCl2 catalyst," *Polym Compos*, vol. 31, no. 3, pp. 507–515, Mar. 2010, doi: 10.1002/pc.20831.
- [63] S. H. Jin, C. H. Kang, K. H. Yoon, D. S. Bang, and Y. Bin Park, "Effect of compatibilizer on morphology, thermal, and rheological properties of polypropylene/functionalized multi-walled carbon nanotubes composite," *J Appl Polym Sci*, vol. 111, no. 2, pp. 1028–1033, Jan. 2009, doi: 10.1002/app.29009.

- [64] B. Sun *et al.*, "Preparation of carbon nanotube-reinforced polyethylene nanocomposite with better anti-scaling and corrosion-resistant properties," *Industrial Chemistry & Materials*, 2023, doi: 10.1039/d3im00031a.
- [65] H. Mahfuz, A. Adnan, V. K. Rangari, and S. Jeelani, "Manufacturing and Characterization of Carbon Nanotube/Polyethylene Composites," *Int J Nanosci*, vol. 4, no. 1, pp. 55–72, 2005, [Online]. Available: [www.worldscientific.com https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2011.06.005](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2011.06.005)
- [66] A. Chanteli and K. I. Tserpes, "Tensile behaviour of carbon nanotube/polypropylene composite material," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 43, no. 10, pp. 330–336, Dec. 2014, doi: 10.1179/1743289814Y.0000000108.
- [67] K. Q. Xiao, L. C. Zhang, and I. Zarudi, "Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 2, pp. 177–182, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.07.027.
- [68] S. Ghoshal, P. H. Wang, P. Gulgunje, N. Verghese, and S. Kumar, "High impact strength polypropylene containing carbon nanotubes," *Polymer (Guildf)*, vol. 100, pp. 259–274, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.polymer.2016.07.069.
- [69] S. L. Ruan, P. Gao, X. G. Yang, and T. X. Yu, "Toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes," *Polymer (Guildf)*, vol. 44, no. 19, pp. 5643–5654, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0032-3861(03)00628-1.
- [70] M. Khodabandelou, M. K. Razavi Aghjeh, H. A. Khonakdar, and M. Mehrabi Mazidi, "Effect of localization of carbon nanotubes on fracture behavior of un-vulcanized and dynamically vulcanized PP/EPDM/MWCNT blend-nanocomposites," *Compos Sci Technol*, vol. 149, pp. 134–148, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.06.003.
- [71] M. K. Seo and S. J. Park, "Electrical resistivity and rheological behaviors of carbon nanotubes-filled polypropylene composites," *Chem Phys Lett*, vol. 395, no. 1–3, pp. 44–48, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.cplett.2004.07.047.
- [72] Q. Zhang, D. R. Lippits, and S. Rastogi, "Dispersion and rheological aspects of SWNTs in ultrahigh molecular weight polyethylene," *Macromolecules*, vol. 39, no. 2, pp. 658–666, Jan. 2006, doi: 10.1021/ma051031n.
- [73] L. He, Q. Xu, R. Song, and C. Hua, "Thermal and morphological characterization of composites prepared by solution crystallization method of high-density polyethylene on carbon nanotubes," *Polym Compos*, vol. 31, no. 5, pp. 913–920, May 2010, doi: 10.1002/pc.20875.
- [74] C. C. Teng *et al.*, "Effect of MWCNT content on rheological and dynamic mechanical properties of multiwalled carbon nanotube/polypropylene composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 39, no. 12, pp. 1869–1875, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.09.004.
- [75] Y. Q. Gill, J. Jin, and M. Song, "Melt flow behavior of high density polyethylene nanocomposites with 1D, 2D and 3D nanofillers," *Nanocomposites*, vol. 1, no. 3, pp. 160–169, Aug. 2015, doi: 10.1179/2055033215Y.0000000012.
- [76] Q. Zhang, S. Rastogi, D. Chen, D. Lippits, and P. J. Lemstra, "Low percolation threshold in single-walled carbon nanotube/high density polyethylene composites prepared by melt processing technique," *Carbon N Y*, vol. 44, no. 4, pp. 778–785, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.carbon.2005.09.039.
- [77] K. Prashantha, J. Soulestin, M. F. Lacrampe, P. Krawczak, G. Dupin, and M. Claes, "Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties," *Compos Sci Technol*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1756–1763, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.10.005.
- [78] M. R. Nobile, G. P. Simon, O. Valentino, and M. Morcom, "Rheological and structure investigation of melt mixed multi-walled carbon nanotube/PE composites," in *Macromolecular Symposia*, 2007, pp. 78–87. doi: 10.1002/masy.200750110.
- [79] O. Valentino *et al.*, "Influence of the polymer structure and nanotube concentration on the conductivity and rheological properties of polyethylene/CNT composites," *Physica E Low Dimens Syst Nanostruct*, vol. 40, no. 7, pp. 2440–2445, May 2008, doi: 10.1016/j.physe.2008.02.001.
- [80] C. Penu, G. H. Hu, A. Fernandez, P. Marchal, and L. Choplin, "Rheological and electrical percolation thresholds of carbon nanotube/polymer nanocomposites," *Polym Eng Sci*, vol. 52, no. 10, pp. 2173–2181, 2012, doi: 10.1002/pen.23162.
- [81] J. H. Lin *et al.*, "Preparation and compatibility evaluation of polypropylene/high density polyethylene polyblends," *Materials*, vol. 8, no. 12, pp. 8850–8859, 2015, doi: 10.3390/ma8125496.
- [82] J. W. Teh, A. Rudin, and J. C. Keung, "A Review of Polyethylene- Polypropylene Blends and Their Compatibilization," *Advances in Polymer Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–23, 1994. doi:10.1002/adv.1994.060130101
- [83] J. Finlay, M. J. Hill, P. J. Barham, K. Byrne, and A. Woogara, "Mechanical Properties and Characterization of Slowly Cooled Isotactic Polypropylene/High-Density Polyethylene Blends," *J Polym Sci B Polym Phys*, vol. 41, pp. 1384–1392, 2003. doi.org/10.1002/polb.10440
- [84] J. Finlay, S. Sheppard, S. Tookey, M. J. Hill, P. J. Barham, and H. H. Wills, "Unexpectedly High Young's Moduli Recorded for iPP/HDPE blends," *J Polym Sci Part B: Polym Phys*, vol. 39, pp. 1404–1414, 2001. doi.org/10.1002/polb.1112
- [85] P. Montes, Y. A. Rafiq, and M. J. Hill, "A study of blends of isotactic polypropylene with high density polyethylene by transmission electron microscopy," *Polymer (Guildf)*, vol. 39, no. 25, pp. 6669–6672, 1998. doi.org/10.1002/polb.1112
- [86] A. C. Baudouin, C. Bailly, and J. Devaux, "Interface localization of carbon nanotubes in blends of two copolymers," *Polym Degrad Stab*, vol. 95, no. 3, pp. 389–398, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.007.
- [87] R. Cardinaud and T. McNally, "Localization of MWCNTs in PET/LDPE blends," *Eur Polym J*, vol. 49, no. 6, pp. 1287–1297, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2013.01.007.
- [88] E. Cohen *et al.*, "Hierarchical structures composed of confined carbon nanotubes in cocontinuous ternary polymer blends," *Macromolecules*, vol. 46, no. 5, pp. 1851–1859, Mar. 2013, doi: 10.1021/ma301903n.
- [89] R. A. Khare, A. R. Bhattacharyya, A. S. Panwar, S. Bose, and A. R. Kulkarni, "Dispersion of multiwall carbon nanotubes in blends of polypropylene and acrylonitrile butadiene styrene," *Polym Eng Sci*, vol. 51, no. 9, pp. 1891–1905, Sep. 2011, doi: 10.1002/pen.21985.
- [90] X. Q. Liu, W. Yang, B. H. Xie, and M. B. Yang, "Influence of multiwall carbon nanotubes on the morphology, melting, crystallization and mechanical properties of polyamide 6/acrylonitrile-butadiene-styrene blends," *Mater Des*, vol. 34, pp. 355–362, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.028.

- [91] X. Qi, P. Dong, Z. Liu, T. Liu, and Q. Fu, "Selective localization of multi-walled carbon nanotubes in bi-component biodegradable polyester blend for rapid electroactive shape memory performance," *Compos Sci Technol*, vol. 125, pp. 38–46, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.compscitech.2016.01.023.
- [92] F. Tao *et al.*, "Influence of nanoparticle-polymer interactions on the apparent migration behaviour of carbon nanotubes in an immiscible polymer blend," *Polymer (Guildf)*, vol. 52, no. 21, pp. 4798–4805, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.polymer.2011.08.035.
- [93] D. Wu *et al.*, "Selective localization of nanofillers: Effect on morphology and crystallization of PLA/PCL blends," *Macromol Chem Phys*, vol. 212, no. 6, pp. 613–626, Mar. 2011, doi: 10.1002/macp.201000579.
- [94] J. Zhao *et al.*, "A comparison between strain sensing behaviors of carbon black/polypropylene and carbon nanotubes/polypropylene electrically conductive composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 48, no. 1, pp. 129–136, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.01.004.
- [95] Y. Li, D. Li, H. Cheng, C. Han, and L. Xiao, "Morphology and physical properties of composites based on high-density polyethylene/propylene-ethylene random copolymers blends and carbon black," *Polym Test*, vol. 123, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108050.
- [96] J. Parameswaranpillai, H. Pulikkalparambil, S. M. R, and S. Siengchin, "Polypropylene/high-density polyethylene based blends and nanocomposites with improved toughness," *Mater Res Express*, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab18cd
- [97] H. Yui, G. Wu, H. Sano, M. Sumita, and K. Kino, "Morphology and electrical conductivity of injection-molded polypropylene/carbon black composites with addition of high-density polyethylene," *Polymer (Guildf)*, vol. 47, no. 10, pp. 3599–3608, May 2006, doi: 10.1016/j.polymer.2006.03.064.
- [98] F. Yu *et al.*, "Anisotropic multilayer conductive networks in carbon nanotubes filled polyethylene/polypropylene blends obtained through high speed thin wall injection molding," *Polymer (Guildf)*, vol. 54, no. 23, pp. 6425–6436, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.polymer.2013.09.047.
- [99] B. Moussa and A. Chahrazad, "University of Calgary PRISM Repository <https://prism.ucalgary.ca> Effect of Masterbatch Type and Concentration on Carbon Nanotube Reinforced Polyolefin Blend Nanocomposites," 2018. doi: 10.11575/PRISM/33233.
- [100] E. Palacios-Aguilar, J. Bonilla-Rios, J. A. Sanchez-Fernandez, A. Vargas-Martinez, J. de J. Lozoya-Santos, and R. Ramirez-Mendoza, "Comparing the elasticity of the melt and electrical conductivity of the solid of PP-HDPE copolymer CNT composites obtained by direct compounding versus dilution of a PP masterbatch," *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 32, no. 10, pp. 1105–1115, Jun. 2021, doi: 10.1177/1045389X20969836.
- [101] K. G. Petrie, O. Osazuwa, A. Docoslis, and M. Kontopoulou, "Controlling MWCNT partitioning and electrical conductivity in melt compounded polypropylene/poly(ethylene-co-octene) blends," *Polymer (Guildf)*, vol. 114, pp. 231–241, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.polymer.2017.02.087.