https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.27

ADDITÍVAN GYÁRTOTT PCTG ÉS PETG-PTFE ANYAGPÁROK TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATA PIN-ON-DISK MÓDSZERREL

TRIBOLOGICAL INVESTIGATION OF ADDITIVELY MANUFACTURED PCTG AND PETG-PTFE MATERIAL PAIRS USING A PIN-ON-DISK METHOD

Zsibók Marcell, Dr. Zwierczyk Péter Tamás***

ABSTRACT

The aim of this study was the tribological pre-screening of additively manufactured PCTG and PETG-PTFE polymer material pairs to support material selection for subsequent dry-running polymer gear investigations. Homogeneous PCTG–PCTG and PETG-PTFE–PETG-PTFE pairs and the heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair in both pin–disk role assignments were compared under identical loading and kinematic conditions. Specimens with layer heights of 0.16 and 0.20 mm were evaluated. The PCTG–PCTG pairs exhibited the least favourable behaviour, losing stable contact after approximately 1 minute at both layer heights. In contrast, both heterogeneous configurations at 0.20 mm completed the nominal 10 min test with a temperature rise of only about 14–15 °C. At 0.16 mm, a marked role asymmetry was observed, while the PETG-PTFE–PETG-PTFE pair showed layer-height-dependent behaviour. The results indicate that, in addition to the individual material properties, the tribological compatibility between the mating polymers is relevant to the screening of additively manufactured polymer machine elements. The heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair is therefore a candidate for repeated and gear-scale investigations.

Keywords: additive manufacturing; PCTG; PETG-PTFE; Pin-on-Disk; tribology; polymer gear; dry sliding; material pairing

1. BEVEZETÉS

1.1. Motiváció

Az additív gyártással előállított polimer alkatrészek egyre több funkcionális gépészeti alkalmazásban jelennek meg. Tribológiai igénybevétel esetén azonban az egyes alapanyagok mechanikai tulajdonságai önmagukban nem elegendők az alkalmazhatóság megítéléséhez, mivel a működési viselkedést az érintkező anyagok párosítása, a súrlódás, a felületi deformáció, a kopás és az ezekhez kapcsolódó hőmérséklet-emelkedés együttesen befolyásolják. Polimer fogaskerekeknél a hőmérséklet növekedése a kifáradási élettartamot is jelentősen módosíthatja [1].

A lehetséges polimer anyagok és anyagpárok száma ugyanakkor nagy, ezért valamennyi jelölt közvetlen fogaskerékszintű vizsgálata jelentős idő- és erőforrásigénnyel járna. Emiatt célszerű egy gyors előszűrési lépcső alkalmazása, amely azonos üzemi körülmények között lehetővé teszi a kedvezőtlen kombinációk kizárását és kijelöli a részletesebb tribológiai, mechanikai, majd fogaskerékszintű vizsgálatra érdemes anyagpárokat.

Egy korábbi vizsgálatban additívan gyártott PLA-, PETG- és ABS-próbatestek termikus viselkedését tanulmányoztuk Pin-on-Disk elrendezésben [2]. A jelen munka ezt a módszertani alapot már célzott tribológiai előszűrésként alkalmazza, kifejezetten a későbbi polimer fogaskerék-vizsgálatok anyagterének szűkítésére.

1.2. Anyagpárosítás és kutatási rés

Száraz polimer–polimer kontaktusban az ellenanyag megválasztása alapvetően befolyásolhatja a tribológiai rendszer működését. Azonos anyagú pároknál bizonyos körülmények között fokozott adhézió, anyagátadás és kölcsönös felületi deformáció jelentkezhet, ugyanakkor különböző anyagok párosítása sem eredményez automatikusan kedvezőbb kopási viselkedést [3,4]. A tribológiai kompatibilitást ezért az adott anyagkombináció és az üzemi feltételek mellett szükséges vizsgálni.

Az anyagválasztás során két, anyagextrúziós additív gyártással jól feldolgozható, poliészter jellegű polimert választottunk eltérő funkcionális szereppel. A PCTG-t potenciális szerkezeti anyagként vizsgáltuk, mivel additív gyártással funkcionális alkatrészek előállítására is alkalmazható [5]. A Francofil PETG-PTFE ezzel szemben 10% PTFE-t tartalmaz [11], ezért tribológiailag módosított ellenanyagként került a vizsgálatba. Fogaskerékpár esetében a két kapcsolódó elem nem szükségszerűen azonos anyagból készül, ezért a szerkezeti és tribológiai funkciók eltérő anyagok közötti megosztása potenciálisan kedvező megoldást jelenthet. A heterogén PCTG–PETG-PTFE párosítás vizsgálatának

* *PhD-hallgató, BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*
** *adjunktus, BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*

hipotézise ezért az volt, hogy a szerkezeti jellegű PCTG és a PTFE-tartalmú PETG-PTFE együtt kedvezőbb száraz csúszási viselkedést mutathat, mint a homogén PCTG–PCTG és PETG-PTFE–PETG-PTFE párok [3,4,6].

A heterogén PCTG–PETG–PTFE anyagpár vizsgálatának kiinduló hipotézise ezért az volt, hogy egy szerkezeti jellegű és egy tribológiailag módosított polimer párosítása a vizsgált száraz csúszókontaktusban kedvezőbb működési viselkedést mutathat, mint a homogén PCTG–PCTG és PETG-PTFE–PETG-PTFE konfigurációk. Additívan gyártott PETG–PTFE-alapú kompozitok tribológiai vizsgálata már megjelent a szakirodalomban [6], azonban a célzott szakirodalmi keresés során nem azonosítottunk olyan közvetlen publikációt, amely a PCTG és a PETG–PTFE homogén, valamint heterogén párosításait mindkét Pin-on-Disk szerepkiosztásban összehasonlította volna. A jelen munka ezért ezt a konkrét anyagpárosítást vizsgálja gyors tribológiai előszűrésként a későbbi, részletesebb, fogaskerékszintű vizsgálatok anyagterének szűkítésére.

1.3. A kutatás célja

A kutatás célja a PCTG–PCTG, PETG-PTFE–PETG-PTFE, PCTG pin–PETG-PTFE tárcsa és PETG-PTFE pin–PCTG tárcsa konfigurációk összehasonlító tribológiai előszűrése egyetlen rögzített, kenőanyag nélküli száraz csúszási üzemi pontban. Az előszűrés során a vizsgált konfigurációkat a maximális felületi hőmérséklet, a hőmérséklet-emelkedés, a stabil működési idő és a látható felületi károsodás alapján hasonlítottuk össze. A vizsgálat célja annak megállapítása volt, hogy a vizsgált anyagpárok közül melyek mutatnak a jelen üzemi pontban kedvezőtlen, illetve további vizsgálatra érdemes működési viselkedést. A 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagságúak összehasonlítása csupán gyártástechnológiai kiegészítés.

Mivel konfigurációnként egy-egy előszűrőmérés készült, a jelen vizsgálat nem az általános tribológiai összefüggések vagy statisztikailag reprezentatív anyagjellemzők meghatározására irányult. A Pin-on-Disk vizsgálatok eredményeiből a fogaskerék élettartamát vagy megengedett terhelését közvetlenül nem lehet meghatározni [8]. Az eredmények célja a későbbi ismétléses tribológiai, mechanikai és fogaskerékszintű vizsgálatokhoz felhasználható anyagpárok körének szűkítése volt.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZER

2.1. Vizsgált anyagok és próbatestek gyártása

A vizsgálatokhoz két anyagextrúziós (MEX) additív gyártással feldolgozható polimer filamentet alkalmaztunk. A vizsgálatokhoz Fiberlogy PCTG filamentet, valamint Francofil PETG-PTFE filamentet alkalmaztunk; utóbbi kereskedelmi megnevezése PETG-PTFE Blanc. A PCTG additív gyártási alkalmazhatóságát korábbi vizsgálatok is tárgyalták [5], míg PETG-PTFE-alapú additív kompozitok mechanikai és tribológiai vizsgálatára szintén található szakirodalmi előzmény [6]. A Francofil gyártói specifikációja szerint a jelen kutatásban alkalmazott PETG-PTFE filament 10% PTFE-t tartalmaz [11].

A pin- és tárcsapróbatesteket Bambu Lab P1S berendezéssel készítettük. Mindkét alapanyag esetében azonos PETG-alapú Bambu Studio profilt alkalmaztunk, hogy az összehasonlítás során a gyártási beállításokból származó eltéréseket a lehetőségekhez mérten csökkentsük. A vizsgálat kiegészítő gyártástechnológiai változója a 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagság volt; a további fő gyártási paramétereket változatlanul tartottuk. A próbatestek gyártásához alkalmazott fontosabb paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

Mindkét filamentet a gyártást megelőzően legalább 12 órán keresztül 60 °C-on szárítottuk. A próbatesteken külön szabványos klimatikus kondicionálást nem végeztünk. A próbatesteket PEI-tárgyasztalfelületen, a legnagyobb sík felületükkel a tárgyasztalra fektetve gyártottuk. A Pin-on-Disk vizsgálat során a próbatest felső, nyomtatott sík felülete vett részt a tribológiai kontaktusban.

1. táblázat. A próbatestek fő gyártási paraméterei

Paraméter	Érték
Nyomtató	Bambu Lab P1S
Fúvókaátmérő	0,4 mm
Fúvóka-hőmérséklet	250 °C
Tárgyasztal-hőmérséklet	70 °C
Tárgyasztalfelület	PEI
Rétegvastagság	0,16 / 0,20 mm
Kitöltési tényező	100%
Kerületek száma	4
Felső / alsó tömör héj	1,5 / 1,5 mm
Jellemző vonalszélesség	0,42–0,45 mm
Külső fal névleges sebessége	60 mm/s
Belső fal névleges sebessége	300 mm/s
Kitöltés névleges sebessége	270 mm/s
Első réteg sebessége	50 mm/s
Hűtés	20–40%; első 3 réteg: 0%
Előzetes szárítás	60 °C, ≥12 h
Tribológiai kontaktfelület	felső nyomtatott felület

2.2. Pin-on-Disk mérési elrendezés és kiértékelés

A tribológiai vizsgálatokat saját fejlesztésű Pin-on-Disk mérőberendezéssel végeztük, amelynek korábbi változatát már bemutattuk [2]. A mérési elrendezésben a lineárisan megvezetett pin-próbatestet normálerővel a forgó polimer tárcsa felső felületéhez szorítottuk. A tárcsa forgómozgását hajtóműves villamos motor biztosította, míg a tangenciális súrlódási erőt erőmérő szenzor rögzítette; a jelet HBM PMX mérőerősítő és adatfeldolgozó rendszer dolgozta fel. A mérési elrendezést és a fő geometriai paramétereket az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A Pin-on-Disk mérőberendezés és a 30 kg holttömeggel létrehozott normálerő alkalmazása.

Az ASTM G99 szabvány Pin-on-Disk és Ball-on-Disk elrendezések általános mérési elvét ismerteti, amelyben meghatározott normálerő mellett rögzített pin vagy golyó érintkezik forgó tárcsával [9]. A jelen vizsgálat ennek megfelelő pin–disk geometriát, állandó normálerőt, pályasugarat és csúszási sebességet alkalmazott; azonban célja a tribológiai előszűrés volt, ezért teljes ASTM G99 szerinti megfelelőség igazolása nem képezte a munka tárgyát.

Az előszűréshez 30 kg referencia tömeget alkalmaztunk, amely:

$$F_N = m \cdot g = 294{,}3 \ [N] \qquad (1)$$

Névleges normálerőnek felel meg és megközelíti a mérőberendezés 300 N maximális terhelhetőségét. A nagy terhelési szintet azért választottuk, mert korábbi mérési tapasztalataink alapján kisebb terhelés mellett a rövid előszűrési időn belül kevésbé markáns különbségek jelentkeztek az anyagpárok között [2].

A Ø8 mm-es pin névleges homlokfelülete:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 50{,}27 \ [mm^2] \qquad (2)$$

Ebből a névleges felületi nyomás:

$$p = \frac{F_N}{A} = 5{,}85 \ [MPa] \qquad (3)$$

A 20 mm-es pályasugár és a 24 min⁻¹ fordulatszám mellett a csúszási sebesség:

$$v = \frac{2 \cdot R \cdot \pi \cdot n}{60} = \ 0{,}0503 \ [\mathrm{m/s}] \qquad (4)$$

ahol: R = 20 mm és n = 24 min⁻¹ mellett. Az egyetlen vizsgált üzemi ponthoz tartozó PV-érték:

$$PV = p \cdot v = 0{,}294 \ [MPa \cdot m/s] \qquad (5)$$

A tangenciális erő jelét a mérőrendszer 0,1 s-időközönként rögzítette, és ebből folyamatosan számította a súrlódási tényezőt:

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} \approx 0{,}20 \qquad (6)$$

A vizsgált konfigurációk között a számított súrlódási tényező eltérése tízezred nagyságrendű volt, és a mérés során jellemzően $\mu \approx 0{,}20$ érték adódott. A súrlódási tényező részletes tranziens vizsgálata nem volt a jelen előszűrőmérés célja.

Valamennyi konfigurációt azonos normálerő, fordulatszám, pályasugár és 10 perces névleges vizsgálati idő mellett mértük. A vizsgálatokat kenőanyag nélküli, száraz csúszókontaktusban végeztük. A próbát a névleges mérési idő előtt szakítottuk meg, amikor a pin kopása vagy deformációja miatt az eredeti kontaktgeometria és a stabil érintkezés már nem voltak fenntarthatók. A fő mérési paramétereket a 2. táblázat foglalja össze.

A tárcsa felületi hőmérsékletét NEO 75-276 infravörös hőmérővel mértük. A készüléket gyári alapbeállításával használtuk. A tárcsa polimer felületét minden mérési időpontban pásztáztuk és az adott időpontban észlelt legnagyobb felületi hőmérsékletet rögzítettük. A hőmérsékleti adatokat 1 perces időközönként vettük fel. A vizsgálat célja nem egy rögzített pont kontakthőmérsékletének vagy teljes hőmérsékletmezőjének meghatározása, hanem a konfigurációk maximális felületi hőmérséklet alapján történő összehasonlító előszűrése volt. A termikus válasz jellemzésére az alábbi összefüggést használtuk:

$$\Delta T = T_{max} - T_0 \ [°\mathrm{C}] \qquad (7)$$

A kézi infravörös mérésből adódó geometriai és kibocsátási bizonytalanság miatt a hőmérsékleti eredményeket összehasonlító termikus indikátorként értelmeztük.

2. táblázat. A Pin-on-Disk vizsgálat rögzített paraméterei

Paraméter	Érték
Referencia tömeg	30 kg
Normálerő, F_N	294,3 N
Pin átmérő, d	8 mm
Kontaktfelület, A	50,27 mm²
Pályasugár, R	20 mm
Fordulatszám, n	24 min⁻¹
Csúszási sebesség, v	0,0503 m/s
Felületi nyomás, p	5,85 MPa
PV	0,294 MPa·m/s
Súrlódási tényező, μ	≈ 0,20
Hőmérséklet-adatok időköze	1 min
Vizsgálati idő, t	10 min
Kontaktus	kenőanyag nélküli száraz csúszás

A Pin-on-Disk elrendezésben a lineárisan megvezetett pin próbatestet normálerővel a forgó polimer tárcsa felső nyomtatott felületéhez szorítottuk. A tárcsa forgása során a pin rögzített pályasugáron érintkezett a tárcsával. A pin–tárcsa kontaktusának geometriai kialakítását a 2. ábra szemlélteti, ami közvetlenül az egyik mérés után készült. Látható, hogy a PIN jelentős kopást szenvedett. A tárcsán pedig látszik az érintkezés köríve.



2. ábra. A Pin-on-Disk vizsgálat pin–tárcsa kontaktusának kialakítása PCTG-tárcsa és PETG–PTFE pin alkalmazásával.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Termikus és működési viselkedés

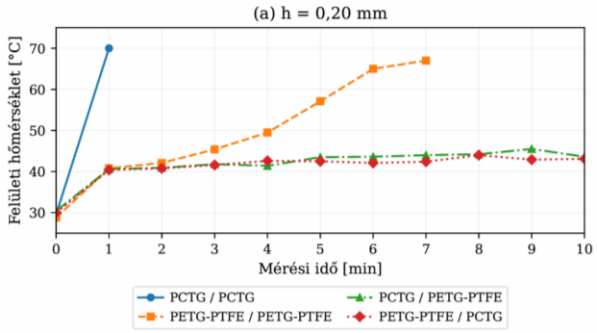
A jelen előszűrőmérésekben a vizsgált konfigurációk között eltérő termikus és működési viselkedés volt megfigyelhető. A hőmérséklet időbeli változását a 3a–b. ábrán szemléltetjük, míg a fő számszerű eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

A PCTG–PCTG párosítás mindkét vizsgált rétegvastagságnál megközelítőleg 1 perc alatt elvesztette a stabil kontaktust. A PETG-PTFE–PETG-PTFE konfiguráció 0,20 mm-es rétegvastagság esetén körülbelül 7 percig működött, míg a 0,16 mm-es változat teljesítette a 10 perces névleges vizsgálati időt.

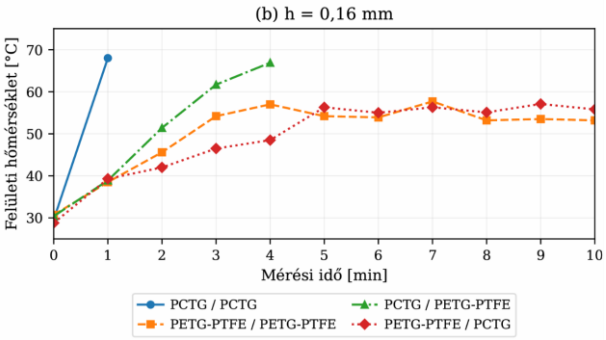
A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk mindkét szerepkiosztásban teljesítették a teljes névleges mérési időt. Ezeknél adódott a legkisebb mért hőmérséklet-emelkedés: PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin esetén $\Delta T = 15{,}1\ °C$, míg $PETG - PTFE$ tárcsa $-$ PCTG pin esetén $\Delta T = 14{,}0\ °C$.

A 0,16 mm-es heterogén konfigurációknál eltérő működési viselkedés jelentkezett. PETG-PTFE tárcsa és PCTG pin alkalmazásakor a mérés a teljes 10 perces névleges időtartamig folytatható volt, míg fordított szerepkiosztásban, PCTG tárcsa és PETG-PTFE pin esetén a vizsgálat körülbelül 4 perc után megszakadt.

A súrlódási tényező valamennyi konfigurációnál közel azonos, $\mu \approx 0{,}20$ értéket mutatott. A konfigurációk között a számított súrlódási tényező eltérése csak tízezred nagyságrendű volt, ezért a jelen mérésekben megfigyelt termikus és károsodási különbségek nem társultak számottevő eltéréshez a makroszkopikus súrlódási tényezőben. A súrlódási tényező részletes tranziens értékelése nem képezte a jelen előszűrő vizsgálat tárgyát. A jelmagyarázatban az első anyag a tárcsa, a második pedig a pin anyagát jelöli.



3a. ábra A felületi hőmérséklet időbeli változása 0,20 mm-es rétegvastagság esetén.



3b. ábra A felületi hőmérséklet időbeli változása 0,16 mm rétegvastagságú rétegnél.

3. táblázat. A vizsgált anyagpárok összefoglaló előszűrési eredményei

0,20 mm rétegvastagság eset

Konfiguráció (tárcsa / pin)	Eredmény
PCTG / PCTG	T_{max} 70,0 °C; ΔT 40,4 °C; t ≈ 1 min; súlyos, nem javasolt
PETG-PTFE / PETG-PTFE	T_{max} 67,0 °C; ΔT 38,2 °C; t≈7 min; jelentős, korlátozott
PCTG / PETG-PTFE	T_{max} 45,5 °C; ΔT 15,1 °C; t ≥ 10 min; enyhe, tovább vizsgálandó
PETG-PTFE / PCTG	T_{max} 44,0 °C; ΔT 14,0 °C; t ≥ 10 min; enyhe, tovább vizsgálandó

0,16 mm rétegvastagság

Konfiguráció (tárcsa / pin)	Eredmény
PCTG / PCTG	T_{max} 68,0 °C; ΔT 38,4 °C; t ≈ 1 min; súlyos, nem javasolt
PETG-PTFE / PETG-PTFE	T_{max} 57,7 °C; ΔT 27,0 °C; t ≥ 10 min; nincs jelentős károsodás; megerősítő ismétlés javasolt
PCTG / PETG-PTFE	T_{max} 66,9 °C; ΔT 36,5 °C; t≈4 min; erősen kopott, nem kedvező
PETG-PTFE / PCTG	T_{max} 57,1 °C; ΔT 28,3 °C; t ≥ 10 min; látható, nem kritikus; tovább vizsgálandó

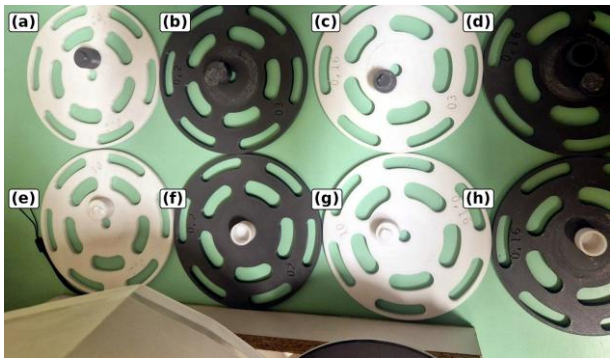
Megjegyzés: ≥10 min a teljes névleges vizsgálati idő teljesítését jelenti.

3.2. Felületi károsodás és előszűrési értékelés

A vizsgálat utáni vizuális értékelés a termikus és működési eredményekkel összhangban eltérő károsodási képet mutatott az egyes konfigurációkban. A PCTG–PCTG párosítás mindkét rétegvastagság esetében súlyos felületi károsodást és jelentős geometriai deformációt mutatott. A 0,20 mm-es PETG-PTFE–PETG-PTFE konfigurációnál szintén jelentős károsodás volt megfigyelhető, míg a 0,16 mm-es változat felületén nem alakult ki hasonló mértékű elváltozás.

A heterogén PCTG–PETG–PTFE párok közül a 0,20 mm-es konfigurációk mutatták a legkedvezőbb vizuális állapotot. A 0,16 mm-es sorozatban a két szerepkiosztás eltérő károsodási képet adott: PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin esetén erősebb kopás volt megfigyelhető, míg PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin esetén a felületi károsodás mérsékeltebb maradt.

A vizsgálat utáni próbatestek összképét a 4. ábra mutatja. Mivel konfigurációnként egy-egy előszűrőmérés készült, a megfigyelt károsodási különbségeket a jelen vizsgálati körülményekhez tartozó tapasztalatként értelmezzük; az általános kopási mechanizmus vagy az anyagpárfüggő törvényszerűség megállapításához ismétléses, részletesebb felületvizsgálatok szükségesek.



4. ábra. A Pin-on-Disk vizsgálatok utáni próbatestek. A szürke elemek PCTG-ből, a fehér elemek pedig PETG-PTFE-ből készültek. (a) PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin, 0,20 mm; (b) PCTG–PCTG, 0,20 mm; (c) PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin, 0,16 mm; (d) PCTG–PCTG, 0,16 mm; (e) PETG-PTFE–PETG-PTFE, 0,20 mm; (f) PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin, 0,20 mm; (g) PETG-PTFE–PETG-PTFE, 0,16 mm; (h) PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin, 0,16 mm.

4. KIÉRTÉKELÉS

4.1. Anyagpárosítással kapcsolatos megfigyelések

A PCTG–PCTG konfiguráció a jelen előszűrő mérésekben gyors hőmérséklet-emelkedést és súlyos felületi károsodást mutatott. Polimer tribológiai rendszerekben az adhézió, az anyagátadás, a felületi deformáció és a kialakuló transfer- vagy tribofilm egyaránt befolyásolhatják a súrlódási és kopási viselkedést [3,4]. A jelen vizsgálat részletes felületanalitikai módszer nélkül nem teszi lehetővé a konkrét kopásmechanizmus azonosítását, ezért az adhéziós és termikusan erősített károsodás csak lehetséges magyarázatként értelmezhető.

A PETG-PTFE jelenléte önmagában nem eredményezett kedvezőbb működési viselkedést minden vizsgált konfigurációban. A PTFE-tartalmú polimerrendszereknél az alacsony nyírási ellenállás és a tribofilm kialakulása kedvezően módosíthatják a súrlódási viselkedést, ugyanakkor a kopás mértéke erősen függhet az anyagösszetételtől és a kontaktfeltételektől [3,4,6]. Ez összhangban áll a jelen mérési tapasztalatokkal, miszerint a PETG–PTFE–PETG–PTFE homogén konfiguráció nem minden esetben hoz kedvezőbb eredményt, mint a heterogén párok.

A vizsgált konfigurációk súrlódási tényezője a mérések során közel azonos, $\mu \approx 0{,}20$ érték körül alakult, miközben a termikus válasz és a felületi károsodás mértéke eltérő volt. Ez arra utal, hogy a jelenleg használt rendszerben a makroszkopikus súrlódási tényező önmagában nem elegendő a megfigyelt működési különbségek leírásához. Az anyagátadás, a hőmegoszlás és a lokális deformáció szerepe további részletes vizsgálatot igényel.

A 0,20 mm-es heterogén konfigurációknál a pin és a tárcsa anyagának felcserélése a jelen mérésekben csak kis eltéréssel járt, míg 0,16 mm-es rétegvastagságnál a két szerepkiosztás eltérő működési viselkedést mutatott. Más tribológiai rendszerekben kimutatták, hogy a rögzített és mozgó tagok felcserélése azonos anyagpár esetén is módosíthatja a súrlódási, hő- és kopási viselkedést [7]. A jelen eredmények azonban konfigurációnként egy-egy mérésen alapulnak, ezért a szerepkiosztás hatására vonatkozó általános következtetéshez ismétléses vizsgálatok szükségesek.

4.2. Rétegvastagsággal kapcsolatos megfigyelések

A két vizsgált rétegvastagsághoz a jelen előszűrő mérésekben eltérő működési viselkedés társult, azonban az eltérés iránya az egyes anyagpároknál nem volt egységes. A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk mindkét szerepkiosztásban teljesítették a névleges mérési időt, míg 0,16 mm-es rétegvastagságnál a két heterogén szerepkiosztás eltérő működési viselkedést mutatott. A homogén PETG-PTFE–PETG-PTFE párosítás esetében ugyanakkor a 0,16 mm-es próbatest teljesítette a 10 perces névleges vizsgálati időt, míg a 0,20 mm-es konfiguráció mérése korábban megszakadt.

Az anyagextrúziós eljárással gyártott alkatrészek tribológiai viselkedését a gyártási paraméterek és a réteges szerkezet is befolyásolhatják; korábbi vizsgálatok például a gyártási orientáció és a csúszókopási viselkedés között is kimutattak kapcsolatot [12]. A jelen vizsgálatban azonban a felületi érdességet, a topográfiát és a felszín alatti szerkezetet nem mértük, továbbá konfigurációnként egy-egy mérés történt. Emiatt a 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagsághoz társuló különbségek

megfigyelt tendenciaként értelmezhetők; a rétegvastagság tribológiai hatására vagy annak az anyagpárral való kölcsönhatására vonatkozóan nem vonható le általános következtetés.

4.3. Tudományos jelentőség és továbbvitel

A jelen vizsgálat elsődleges célja a polimer anyagpárok gyors tribológiai előszűrése volt. A maximális felületi hőmérséklet, a működési idő és a látható károsodás együttes értékelésével kijelölhetők azok a konfigurációk, amelyek részletesebb vizsgálatra érdemesek.

A Pin-on-Disk mérés eredményeiből a fogaskerék-élettartam vagy a megengedett terhelés közvetlenül nem határozható meg [8], ugyanakkor a termikus viselkedés releváns előszűrési szempont lehet polimer fogaskerekek esetében [1]. A további kutatásban az ígéretes anyagpárok ismétléses tribológiai és mechanikai vizsgálata után célszerű kialakítani egy fogaskerékszintű mérési koncepciót.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során additívan gyártott PCTG és PETG-PTFE homogén és heterogén anyagpárok tribológiai viselkedését hasonlítottuk össze egy rögzített száraz Pin-on-Disk üzemállapotban. A PCTG–PCTG párok mindkét rétegvastagságnál körülbelül 1 percen belül elvesztették a stabil kontaktust. A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk ezzel szemben teljesítették a 10 perces névleges vizsgálati időt 14–15 °C-os hőmérséklet-emelkedés mellett. A 0,16 mm-es heterogén konfigurációk között markáns szerepaszimmetria volt megfigyelhető, míg a PETG-PTFE–PETG-PTFE homogén párnál a 0,16 mm-es változat stabilabb viselkedést mutatott. A közel azonos $\mu \approx 0{,}20$ súrlódási tényező ellenére a termikus és károsodási viselkedés jelentősen eltér, ami arra utal, hogy az anyagpárosítás a további tervezésnél figyelembe veendő tényező. A jelen eredmények előszűrési jellegűek; a PCTG–PETG–PTFE anyagpár további ismétléses, fogaskerékszintű vizsgálata indokolt.

6. SUMMARY

This study investigated the tribological behaviour of additively manufactured PCTG and PETG-PTFE homogeneous and heterogeneous material pairs under a fixed dry Pin-on-Disk operating condition. The PCTG–PCTG pairs lost stable contact after approximately one minute at both layer heights. In contrast, both heterogeneous PCTG–PETG-PTFE configurations manufactured with a 0.20 mm layer height completed the nominal 10 min test while showing only about 14–15 °C temperature rise. At 0.16 mm, the heterogeneous pair exhibited a clear role asymmetry, whereas the self-mated PETG-PTFE pair showed better stability than its 0.20 mm counterpart. The measured friction coefficient was approximately $\mu \approx 0.20$ across all configurations; however, their thermal responses and surface degradation differed substantially. This indicates that the tribological compatibility of the mating materials cannot be assessed solely from the macroscopic friction coefficient. The present results are intended as a screening step, and the heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair is considered a promising candidate for repeated testing and subsequent gear-scale validation.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Francofil vállalatnak a kutatáshoz felhasznált PETG-PTFE alapanyag biztosításáért, valamint a szakmai együttműködésért. Köszönjük szépen Dr. Baka Ernő Zsolt és Dr. Csobán Attila szakmai támogatását.

8. IRODALOM

[1] KALIN M., KUPEC A.: The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. Wear, Vol. 376–377, 2017, pp. 1339–1346. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.003

[2] ZSIBÓK M., BAKA E. Z., HORÁK P.: Additívan gyártott polimer próbatestek Pin-on-Disk vizsgálata. GÉP, 76. évf., 3–4. sz., 2025, pp. 128–131. https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.31

[3] JÓZWIK J., DZIEDZIC K., BARSZCZ M., PASHECHKO M.: Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites. Materials, Vol. 13, No. 1, 2020, 75. https://doi.org/10.3390/ma13010075

[4] VASILEV A. P., STRUCHKOVA T. S., NIKIFOROV L. A., OKHLOPKOVA A. A., GRAKOVICH P. N., SHIM E. L., CHO J.-H.: Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fibre and Layered Silicate Fillers. Molecules, Vol. 24, No. 2, 2019, 224. https://doi.org/10.3390/molecules24020224

[5] AMIN A., JACK D. A., RAVINDRANATH P. K., FLECK T. J.: Nondestructive quantification of internal raster path for additively manufactured components via ultrasonic testing. Scientific Reports, Vol. 14, 2024, 11416. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61416-5

[6] AZIM S., VANDE RYSE R., D'HOOGE D. R., EDELEVA M., CARDON L., DE BAETS P.: Comparing Mechanical and Tribological Properties of PETg-PTFE-EG/h-BN Composites Produced by Injection Moulding and Additive Manufacturing. Journal of Composites Science, Vol. 10, No. 10, 2026, 511. https://doi.org/10.3390/jcs10100511

[7] XU A., TIAN P., WEN S., GUO F., HU Y., JIA W., DONG C., TIAN Y.: Differences in Tribological Behaviors upon Switching Fixed and Moving Materials of Tribo-pairs including Metal and Polymer. Scientific Reports, Vol. 7, 2017, 13041. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13262-x

[8] MATKOVIČ S., POGAČNIK A., KALIN M.: Wear-coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: A critical appraisal of methodologies. Wear, Vol. 480–481, 2021, 203944. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203944

[9] ASTM INTERNATIONAL: ASTM G99-23 – Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. ASTM International, 2023. https://doi.org/10.1520/G0099-23

[10] FIBERLOGY: PCTG Filament. Fiberlab S.A., Poland. https://fiberlogy.com/en/product/pctg-filament/, Hozzáférés: 2026.10.18.

[11] FRANCOFIL: *PETG PTFE Blanc – Technical Filament*. Francofil, France. https://francofil.fr/en/product/petg-ptfe-blanc/ Hozzáférés: 2026.10.18.

[12] ALAMRO T., YUNUS M., ALFATTANI R., ALNASER I. A.: Effect of part build orientations and sliding wear factors on tribological characteristics of FDM processed parts. Archive of Mechanical Engineering, Vol. 68, No. 3, 2021, pp. 321–336. https://doi.org/10.24425/ame.2021.138395