

DunaKavics

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2021. IX. évfolyam V. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok

PÁZMÁN JUDIT-KOVÁCS-BOKOR ÉVA
Biológiailag lebomló polimerek

KÖVÁRI ATTILA-KATONA JÓZSEF
-WIZNER KRISZTIÁN-UJBÁNYI
TIBOR-NAGY BÁLINT-BERKI
BORBÁLA-SUDÁR ANNA
Ember-számítógép-, valamint
megjelenítő és elemző inter-
fészek alkalmazási lehetőségei

KIRÁLY ZOLTÁN-KIRÁLY VENCEL
-DOMONKOS LEVENTE LÁSZLÓ
Kézi gesztusvezérlés-alapú em-
ber-számítógép-interfész

PÁZMÁN JUDIT
Gumikeverékek és különböző ada-
lékanyagok hatása a természetes
és mesterséges alapanyagokra



DunaKavics

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2021. IX. évfolyam V. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok

MEGJELENIK ÉVENTE 12 ALKALOMMAL

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

András István, Bacsa-Bán Anetta, Balázs László,
Nagy Bálint, Németh István, Pázmán Judit, Rajcsányi-Molnár Mónika.

Felelős szerkesztő Németh István
Tördelés Duma Attila

Szerkesztőség és a kiadó címe 2400 Dunaújváros, Táncsics M. u. 1/a.

Kiadja DUE Press, a Dunaújvárosi Egyetem kiadója
Felelős kiadó Dr. habil András István, rektor



A lap megjelenését támogatta a Nemzeti Kulturális Alap

<http://dunakavics.due.hu>

ISSN 2064-5007

Tartalom

PÁZMÁN JUDIT-KOVÁCS-BOKOR ÉVA

Biológiailag lebomló polimerek

5

KÖVÁRI ATTILA-KATONA JÓZSEF-WIZNER KRISZTIÁN-UJBÁNYI TIBOR-

NAGY BÁLINT-BERKI BORBÁLA-SUDÁR ANNA

***Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek
alkalmazási lehetőségei***

45

KIRÁLY ZOLTÁN-KIRÁLY VENCEL-DOMONKOS LEVENTE LÁSZLÓ

Kézi gesztusvezérlés-alapú ember-számítógép-interfész

61

PÁZMÁN JUDIT

***Gumikeverékek és különböző adalékanyagok hatása a természetes
és mesterséges alapanyagokra***

77

Galéria

(Duma Bálint fotói)

103



Biológiailag lebomló polimerek

Összefoglalás: A PLA egy keményítőből készült bioműanyag, pontosabb megfogalmazásban, a genetikailag módosított kukorica keményítőjéből gyártják. Egyes szakirodalmak szerint a PLA biológiai úton bomlik le. Ez az állítás azonban nem egyértelmű, mivel a „biológiai bomlás”-t mint degradációs folyamatot elég tág határok között alkalmazzák. A PLA egy „komposztálható műanyag”, amely „degradáció” útján bomlik le, de igazi „biodegradáció”-ról nem beszélhetünk. Ennek az oka, hogy a PLA nem bomlik vagy biodegradálódik a hulladéklerakóban, csak hőhatásra kezd el bomlani (konkrét esetben 60°C-on, öt nap után). Kutatómunkám során a politejsavak különböző környezeti paraméterekkel szembeni viselkedését tanulmányoztam, választ kerestem arra, hogy a hőmérséklet és a páratartalom, hogyan befolyásolja a 3D-eljárással nyomtatott PLA-szakítópálcák mechanikai jellemzőinek értékét. Klímakamrás teszteleseket végeztünk 40°C, 60°C és 70°C-on 45–65–80% páratartalom mellett. A tesztelt mintákon szakítóvizsgálatot végeztem, melyek eredményeit jelen prezentációmban ismertetem.

Kulcsszavak: Politejsavak; klímateszt; szakítóvizsgálat; hőmérséklet és páratartalom hatása.

Abstract: PLA is a bioplastic made from starch, more specifically made from genetically modified corn starch. According to some literature, PLA is biodegradable. However, this statement is not clear because „biodegradation” is used as a degradation process over a fairly wide range. PLA is a „compostable plastic” that degrades by „degradation”, but real „biodegradation” cannot be said. This is because PLA does not decompose or biodegrade in the landfill, it only starts to decompose under the influence of heat (in this case at 60°C, after five days). In the course of my research I studied the behavior of polylactic acids against different environmental parameters, I was looking for an answer to how temperature and humidity affect the value of the mechanical

* *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: pazman@uniduna.hu

** *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: kovacsbe@uniduna.hu

properties of PLA tensile rods printed by the 3D process. Climate chamber tests were performed at 40°C, 60°C and 70°C and 45–65–80% humidity. I performed a tensile test on the tested samples, the results of which I present in this article.

Keywords: Polylactic acid; climate test; tensile test; temperature and humidity.

Bevezető

A kutatómunka azzal kezdődött, hogy a szakirodalomban és az internetes hozzáféréseknél megkerestük a biológiailag lebomló polimerek definícióját, hogy támpontot adjon a kísérleti munkák megtervezéséhez és kivitelezéséhez. A keresgélés eredményeként az alábbi megfogalmazásokat találtuk.

1. Lebomló műanyag, mely esetében a bomlást a természetesen előforduló mikroorganizmusokkal, valamint a baktériumokkal, gombákkal és algákkal való kölcsönhatás eredményezi.
2. Az ASTM (Nemzetközi Szabványügyi Szervezet) definíciója a biológiai úton lebomló műanyagokra: *lebomló műanyag, amely esetében a bomlást a természetesen előforduló mikroorganizmusokkal, úgy, mint baktériumokkal, gombákkal és algákkal való kölcsönhatás eredményezi.*

A definíciók értelmezésében a szakirodalomban használt kifejezések keveredhetnek, valamint biológiai úton történő bomlási folyamatokat, azaz a biodegradációt nagyon tágan értelmezik. A szakirodalmi összefoglalók alapján *a piacon jelenleg háromféle olyan műanyag kategória van, amely lebomlik vagy biológiai úton bomlik le. Ezek a műanyagok három különböző folyamatú úton bomlanak le:*

- a) PLA (politejsav),
- b) oxidatív lebomlás (oxodegradáció)
- c) mikrobiológiai lebomlás (mikrobiodegradáció).

A PLA egy keményítőből készült bioműanyag: konkrétan, genetikailag módosított kukorica keményítőjéből gyártják. A technológiai és támogató szervezetek, mint például a BPI (Biológiailag Lebomló Termékek Intézete) megerősíti azt a tényt, hogy a PLA biológiai úton bomlik le ezért. Ez az állítás azonban nem egyértelmű, mivel ők rendkívül szabadon használják a „biológiai bomlás”-t mint degradációs folyamatra vonatkozó kifejezést. A PLA egy „komposztálható műanyag”, amely „degradáció” útján bomlik le és ezért ez nem igazi „biodegradáció”. A PLA nem bomlik vagy biodegradálódik a hulladéklerakóban, és csak hőhatásra kezd el bomlani (konkrét esetben 60°C-on, öt nap után). Ilyen környezet csak kereskedelmi

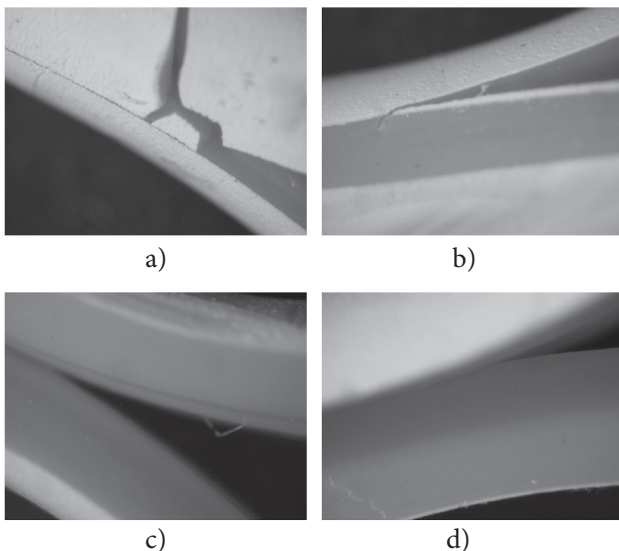
komposztáló telepeken fordul elő, nem pedig a kerti háztartási komposztálóban. A PLA komposztálása során a visszamaradó anyag széndioxid, és mivel a profesz-szionális komposztáló létesítmények jelenleg nem fogják fel a keletkező gázokat, ez általában belekerül a légkörbe. [1]

A definíciókeresést követően arra a megállapításra jutottunk, hogy különböző közegekben fogjuk vizsgálni a politejsavak viselkedését. A kezdeti szakaszban végeztünk virágföldes kísérletet, desztillált vizes áztatást, mesterségesen bekevert tengervízben való áztatást, illetve etil-acetátban is áztattuk a mintákat. A vizsgálati eredmények közül csupán az etil-acetátos áztatás említésre méltó.

[1] (átvéve: http://www.okotermek.hu/index.php?route=pavblog/blog&blog_id=21)

Etil-acetátos áztatás szobahőmérsékleten

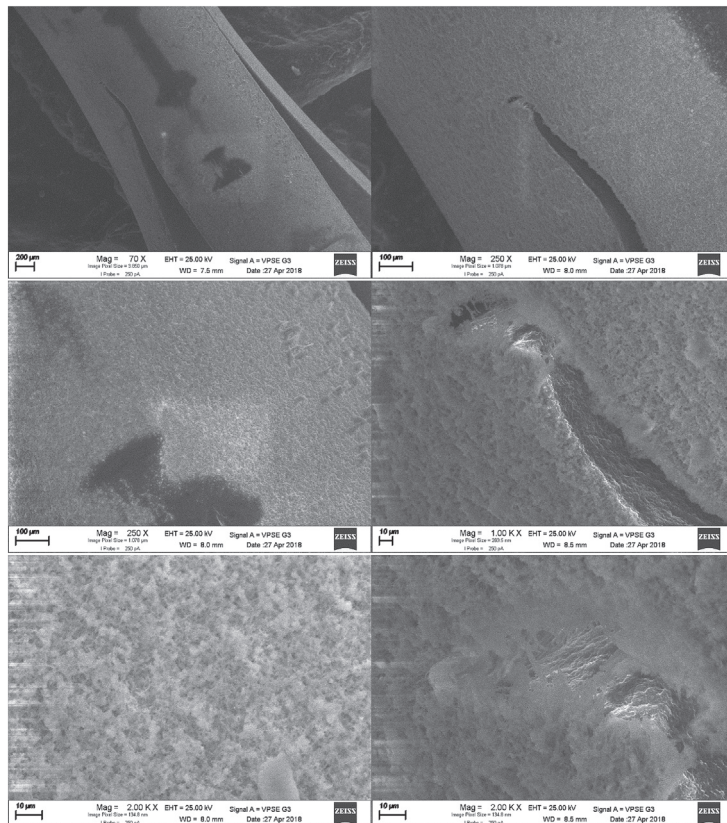
1. ábra. Sztereomikroszkóppal készített felvételek a PLA-szálmintákról



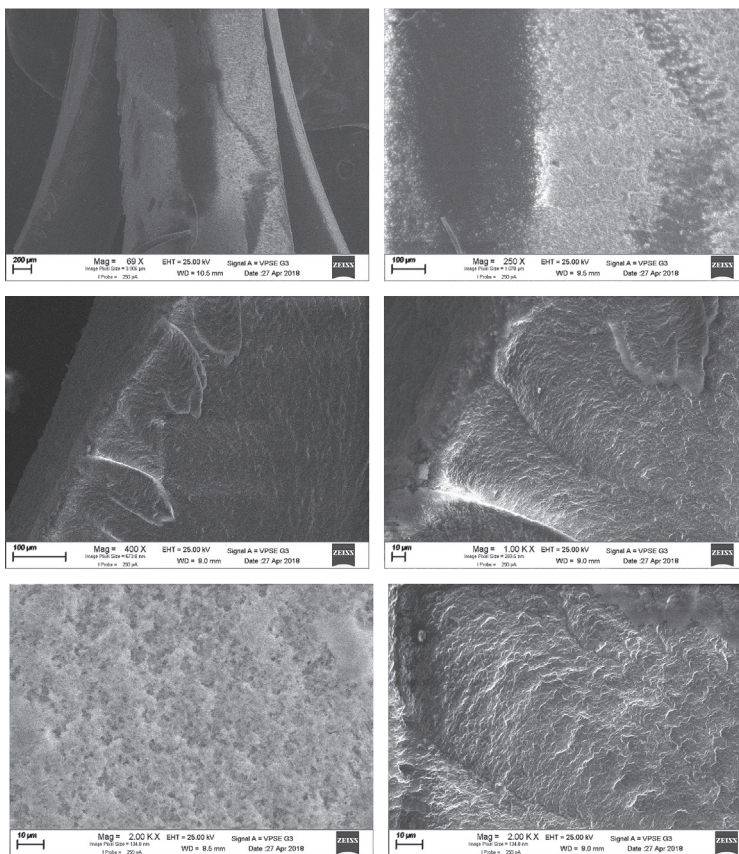
a) 2h áztatás b) 4h áztatás c) 6h áztatás d) 24h áztatás

A szerkezeti változások nyomon követésére pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket is készítettünk.
SEM-vizsgálatok felvételei: etil-acetátban történő áztatás.

2h minta: A fehér réteg a SEM-felvételeken jól látható, hogy a fehér réteg nagyon apró kimaródások, bomlási reakciók terméke, mely a 2000-szeres nagyításban még egyértelműbben kivehető.

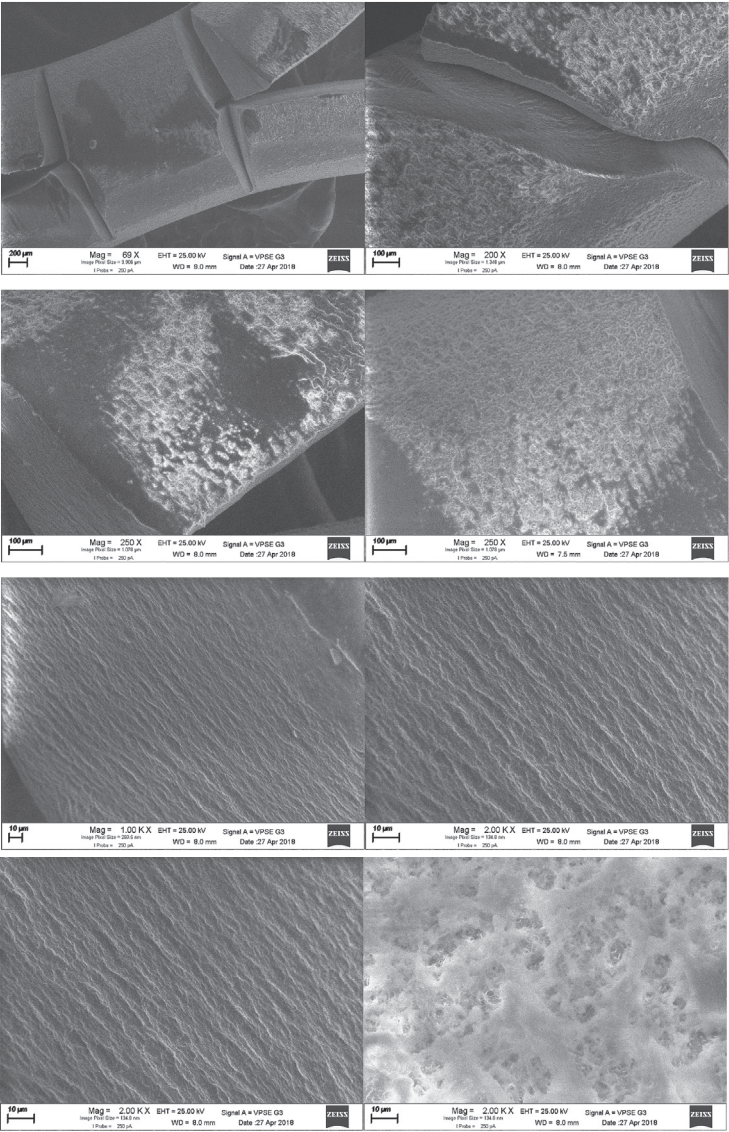


1 napos –24h áztatású minta:



Az 1 napos áztatás után a már szétvált szálak belső felületein is – rétegenként – szétválási folyamatok indultak meg.

14 napos minta:



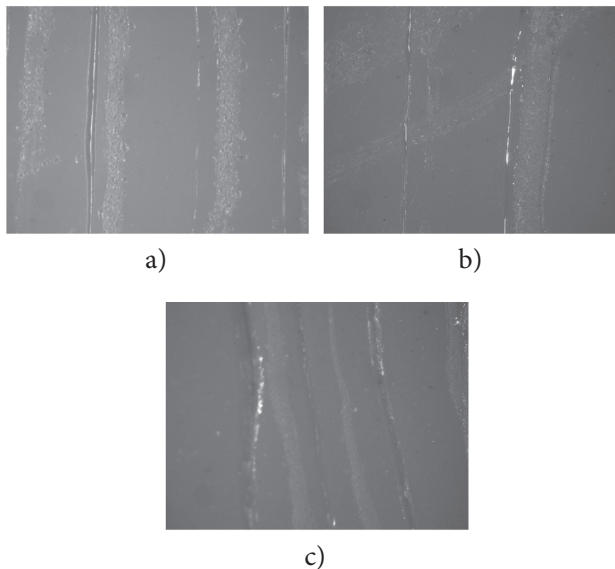
A 14 napos áztatás esetén a hosszmenti repedéseket a keresztmenti felhasadások követték, és végbe ment a teljes minta bomlási folyamata.

Ezt követően a mintákat mesterségesen szimulált esőztetés és napfény együttes hatásának tettük ki, ezek összefoglalóját a második alfejezet foglalja össze.

Xenon-lámpás gyorsított időjárás-vizsgálatok

A gyorsított időjárás-vizsgálatokat xenon lámpás öregbítő kamrában végeztük el, ahol mind a 60°C, mind pedig az esőztetést beállítottuk, tehát a mintákra a meleg és a pára együttes hatását vizsgáltuk. Itt 30x30 mm 3D nyomtató tollal készített lapkákon végeztük el a vizsgálatokat. A vizsgálati idők hasonlóak voltak, mint a korábbiak, itt 1 napos, 7 napos és 14 napos intervallumokat határoztunk meg. A mintákról sztereomikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk.

2. ábra. Xenon-lámpás öregbítésen átesett minták sztereomikroszkópos vizsgálatai

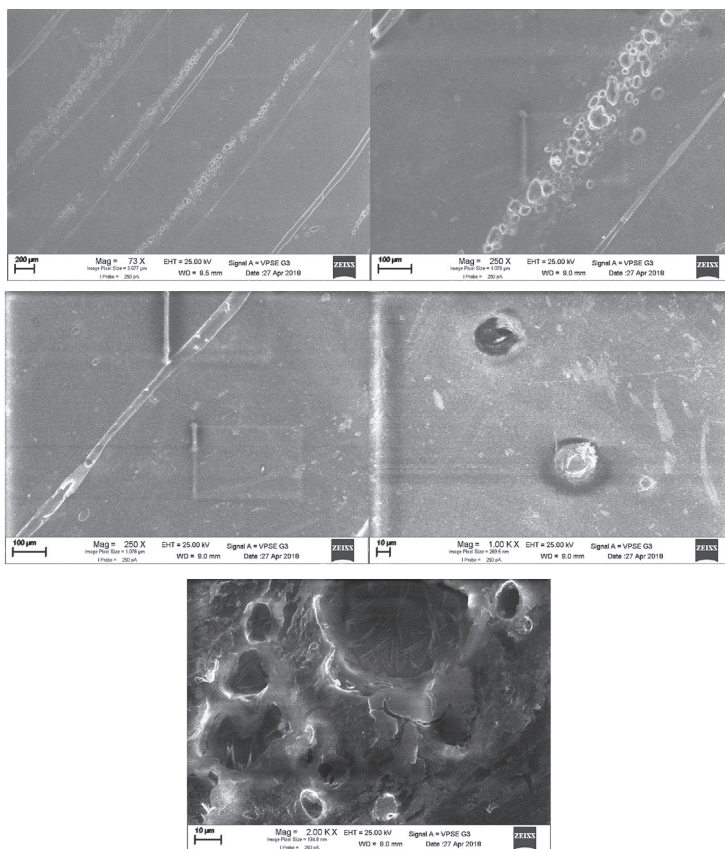


A vizsgálati mintákról készített 50-szeres nagyítású felvételeken az idő előrehaladtával színfakulás, valamint egyre több helyen megjelenő és egyre szélesebb sávokban kialakuló felületi mattulás és hólyagosodás figyelhető meg.

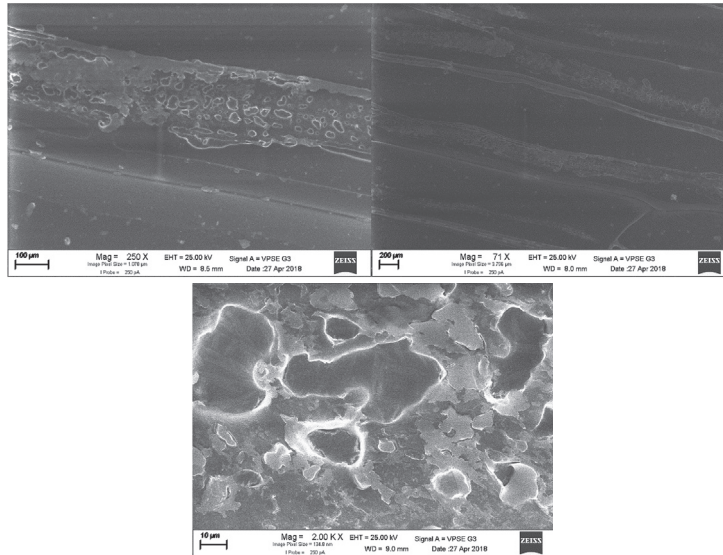
Ezekről a mintákról pásztázó elektronmikroszkóppal is készítettünk felvételeket, ezeken a felületi változások sokkal jobban nyomon követhetők.

SEM-vizsgálatok felvételei:

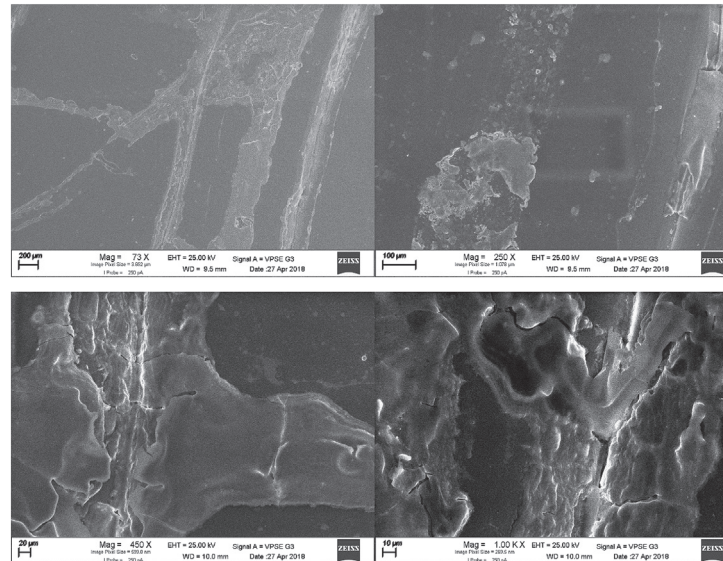
1 napos minta

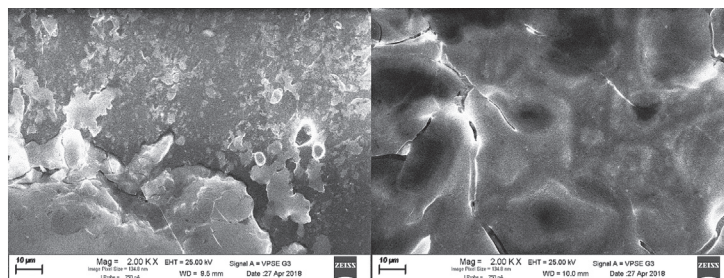


7 napos minta



14 napos minta

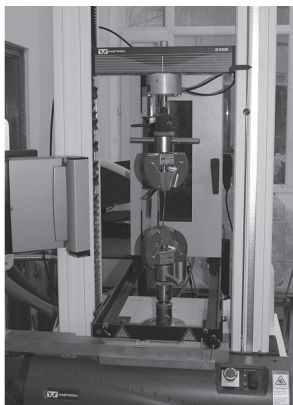




Az előkísérleteket követően egy klímakamra érkezett az egyetemre. Ebben a klímakamra, melyben páratartalom és hőmérséklet, valamint fényintenzitás is beállítható. A páratartalom teljes skálájának felhasználásához eltekintettünk a fényintenzitástól, és csak a páratartalom valamint a hőmérséklet hatását vizsgáltuk a 3D-nyomtatott, immár egzakt geometriával rendelkező mintákra. A próbatesteket 3D-nyomtatóval készítettük szabványos lapos próbatest alakban, melynek lényege az volt, hogy a kezeletlen, illetve a különböző paraméterekkel kezelt mintákon szakítóvizsgálatot végzünk. Ennek segítségével – változtatva a hőmérsékletet és a páratartalmat – információt kapunk a minták PLA mechanikai tulajdonságairól. További változó volt a vizsgálatok során, hogy a 3D-nyomtatás során a minták kitöltöttsége is eltérő volt, készült 20%, 50%, 80% és 100% kitöltöttségű PLA-szakítópálca.

Az első lépés a kezeletlen minták vizsgálata volt, melyhez az alábbi vizsgálóberendezést alkalmaztuk:

Az egyetem felületfizikai laboratóriumában található 1 tonnás INSTRON 3366L1092 szakítógép, mely egy kétszlopos, asztali telepítésű vizsgálati berendezés. Szakító és/vagy nyomás vizsgálatára alkalmas, 50 kN terhelésgény alatt, vagyis elsősorban műanyagok, gumik vizsgálhatók vele.

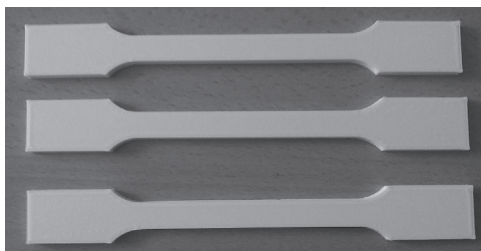


Főbb paraméterek:

- Maximális terhelés: 10 kN (2 250 lbf) teljesítmény.
- Pontosság: 0.5%-os terhelési pontosság a kijelzett terheléshez képest.
- Visszatérési sebesség: max. 1 000 mm/perc (40 in/min).
- Függőleges vizsgálati felület: 1193 mm (47 in).

A vizsgálati mintákat, melyet a 4. ábra szemléltet, a 3. ábrán látható szakítógéppel szakítottuk el, majd a szakadási felületekről a korábban ismertetett sztereomikroszkóppal kis és nagy nagyítású felvételeket készítettünk.

4. ábra. 3D nyomtatott szakítópálcák



VIZSGÁLATI PARAMÉTEREK

Első körben csak magát a vizsgálati módszert és a beállított paramétereket ellenőriztük, melyhez PLA-mintákat használtam, de ezek még fehér színűek voltak és csupán egy kitöltöttségi fokkal rendelkeztek. Mivel a szakítóvizsgálathoz minimum 3 pálca szükséges, hogy a vizsgálat kiértékelhető legyen, így én is ezt a darabszámot használtam. A szakításhoz alkalmazott húzási sebesség 4 mm/perc volt. A kezdeti vizsgálati eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

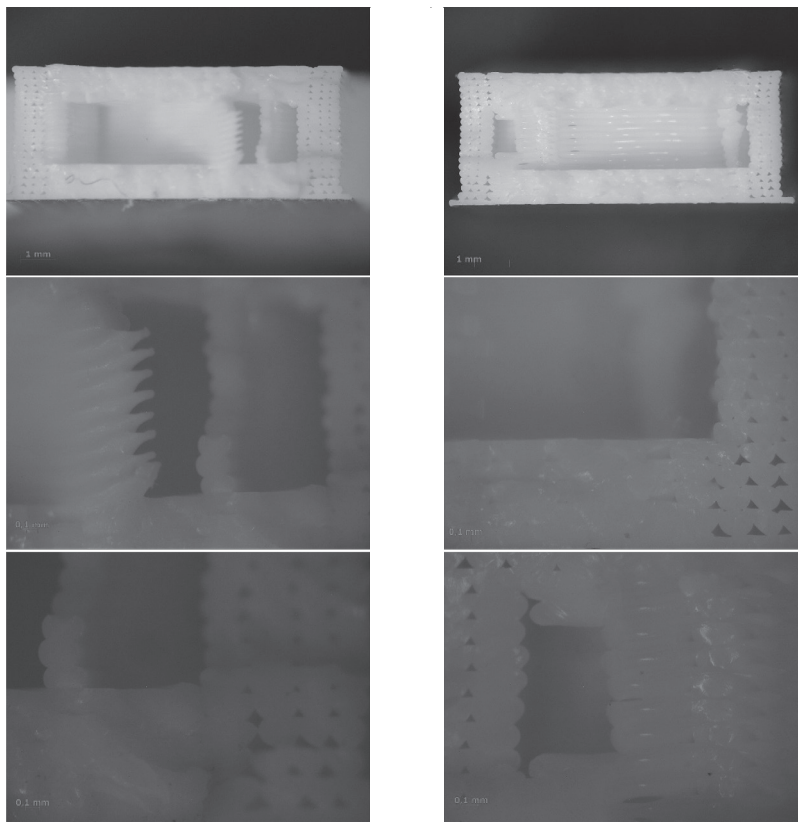
1. táblázat. PLA-szakítóvizsgálat eredményei – elővizsgálatok

Megnyúlás – törési szakadás (%)	Maximum terhelés (N)	Modulusz (GPa)
3,1	1401,36	1,42
3,26	1480,27	1,5
3,15	1331,8	1,36

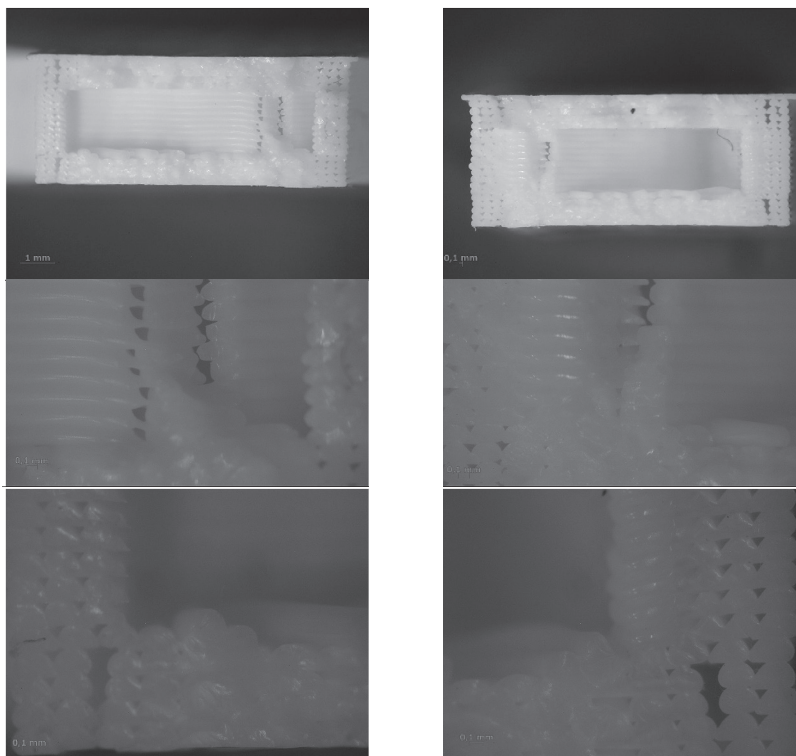
A vizsgálati eredmények alapján látható (1. táblázat), hogy az azonos módon és azonos telítettséggel készített minták hasonlóképpen szakadtak. A kapott maximális terhelőerők is nagyon hasonlóak, csupán a 3. mintáé tér el jobban a másik kettőtől. A szakadásig elviselt nyúlásértékekben számottevő különbség nem figyelhető meg, mindegyik minta kb. 3%-ot nyúlt.

A mintákról szakítás után készített felvételeket a következő ábrák mutatják:

1. minta



2. minta



Ezt követően különböző kitöltöttségű PLA-szakítópalcákat készítettünk, s ezek vizsgálatával folytattuk a PLA-minták mechanikai tulajdonságainak megismerését. A különböző kitöltöttségű PLA-minták szakítóvizsgálatát végeztük el, mely során minden kitöltöttségből 3–3 mintát vizsgáltam. Digitális tolómérővel megmértük 3–3 pontban a minták vastagságát és szélességét, ebből meghatároztuk a kiinduló keresztmetszetet, majd a szakítóvizsgálat után regisztráltuk a szakadáshoz szükséges maximális terhelést, mely értékeket elosztva a kiindulási keresztmetszettel, megkaptuk a minták szakítószilárdság-értékét. A szakítógép számítógépes programja pedig a kiindulási vizsgálati hosszából meghatározta a szakadási nyúlásértékeket. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat. PLA-minták szakítóvizsgálatának eredményei

Kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Átlag-érték	Szakadási nyúlás (%)	Átlag-érték
20	15,91	13,84	2,82	2,5
20	11,06		1,92	
20	14,56		2,79	
50	19,18	17,48	2,59	2,5
50	16,92		2,42	
50	16,35		2,43	
80	20,33	19,31	2,24	2,2
80	18,38		2,09	
80	19,22		2,26	
100	38,79	38,28	4,26	3,8
100	38,57		3,17	
100	37,47		4,1	

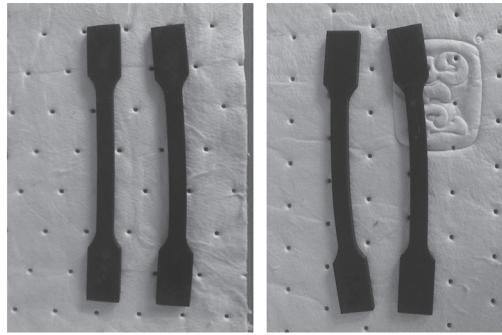
Az eredményekből kitűnik (2. táblázat), hogy a kitöltöttség növelésével a szakítószilárdság növekedett (ezt is vártuk), illetve – s ez egy kicsit meglepett – , hogy az átlagos nyúlásértékek is növekedtek.

Ezt követően újabb 3D-nyomtatott mintákon xenonlámpás tesztnek tettük ki ezeket a mintatípusokat, és az ezt követően is elvégeztük a szakítóvizsgálatot. Arra voltunk kíváncsiak, hogy a 60°C-os szimulált napfény és ezt követő esőztető ciklikus ismétlése hatással lesz-e a szakítószilárdsági eredményekre.

A szakítópálcákról a kezelés után készítettünk felvételeket, hogy lássuk, vizuálisan már magának az öregítésnek is van-e hatása a vizsgálati mintákra.

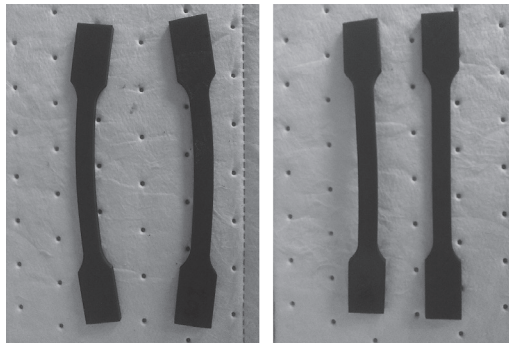
A makrofelvételeket az 5. ábra mutatja.

5. ábra. PLA 1 napos öregített minták szakítóvizsgálat előtt



a)

b)



c)

d)

- a) 20% kitöltöttség
- b) 50% kitöltöttség
- c) 80% kitöltöttség
- d) 100% kitöltöttség

A felvételeken jól látszik, hogy a nem 100%-ban kitöltött minták a kezelés hatására elgörbültek. Ezt a görbületet a vizsgálat előtt igyekeztünk belőlük kisebb előfeszítéssel kivenni, hogy a szakítóvizsgálat során értékelhető eredményeket kapjak.

Elvégeztük a különböző kitöltöttségű PLA-minták 1 napos xenonlámpás öregbítését a korábban 3D-nyomtatással készített szakítópálcákon. Mindegyik kitöltöttségből 2–2 mintát öregítettünk, ugyanis csak ennyi állt rendelkezésünkre. A xenonlámpás öregítés során 60°C-ot szimulált napfényt és azt követő esőztetést végeztem 24 órás időtartam alatt. Az így öregített mintákon ezt követően végeztük el a szakítóvizsgálatot. A vizsgálat előtt digitális tolómérővel megmértük 3–3 pontban a minták vastagságát és szélességét, ebből meghatároztam a kiinduló keresztmetszetet, majd a szakítóvizsgálat után regisztráltuk a szakadáshoz szükséges maximális terhelést, mely értékeket elosztva a kiindulási keresztmetszettel, megkaptuk a minták szakítószilárdság-értékét. A szakítógép számítógépes programja pedig a kiindulási vizsgálati hosszából meghatározta a szakadás nyúlás értékeit. Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

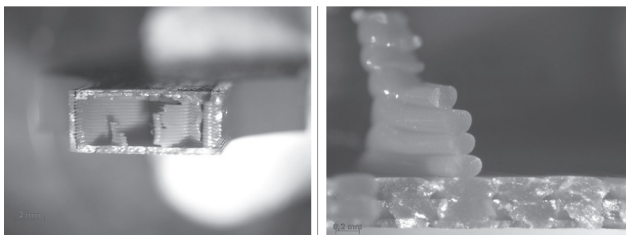
3. táblázat. Öregített PLA-minták szakítóvizsgálatának eredményei

Próbatest neve	Kitöltöttség	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Jeltávolság	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
Ö1	20	9,9	4,1	80,6	586,3	14,62	3,1	0,7
Ö2	20	9,9	4,1	79,7	586,8	14,56	3,1	0,7
Ö3	50	10,0	4,0	75,2	649,3	16,30	2,9	0,8
Ö4	50	9,9	4,0	82,1	694,0	17,62	3,1	0,8
Ö5	80	9,9	4,0	82,3	794,5	20,04	3,1	0,9
Ö6	80	9,9	4,1	80,4	857,0	21,48	3,9	0,9
Ö7	100	9,9	4,1	81,0	1382,3	33,96	3,3	1,5
Ö8	100	9,9	4,1	80,2	1436,4	35,59	4,7	1,5

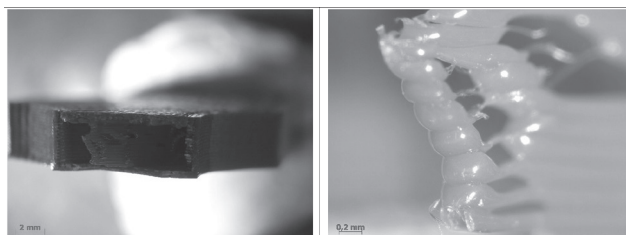
A vizsgálati eredmények alapján látszik (3. táblázat), hogy a kitöltöttség növelésével a szakítószilárdsági értékek növekedtek. A 20% kitöltöttséghez 14,6 MPa, míg a 100%-hoz 33–35 MPa. Ha ezeket az értékeket összehasonlítjuk az előző, nem öregített minták mechanikai jellemzőivel (melyek rendre: 20% – 13,84MPa; 50% – 17,48 MPa, 80% – 19,31MPa, 100% – 38,28 MPa), akkor látható, hogy a 20%-os öregített minta nagyobb szakítószilárdsági értéket, az 50%-os kismértékű csökkenést (17MPa), a 80%-os ismét növekedést (20,75MPa), míg a 100%-os minta jelentősebb csökkenést mutat (34,75MPa). Tehát már az egynapos kezelésnek is van hatása a szakítószilárdsági értékekre, de a degradációs folyamatok még csak most kezdtek

beindulni, tényleges hatást csak hosszabb kezelésekkal lehet kimutatni. A szakadási felületekről sztereomikroszkópos felvételeket készítettünk, ezek az alábbiak:

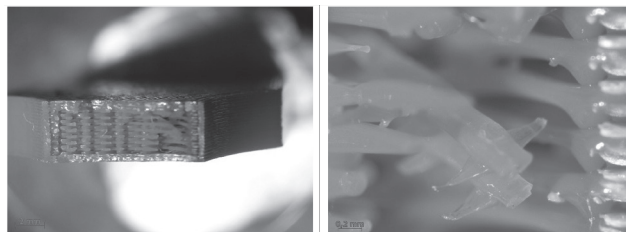
Öregített minta 1. (20%)



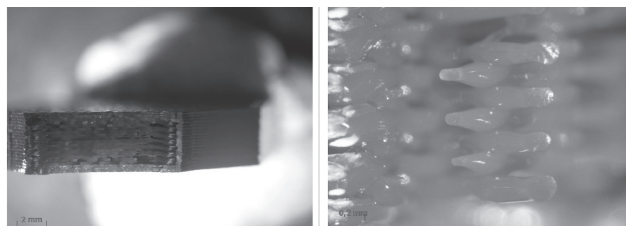
Öregített minta 2. (20%)



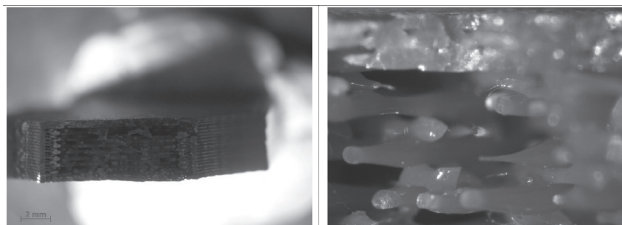
Öregített minta 3. (50%)



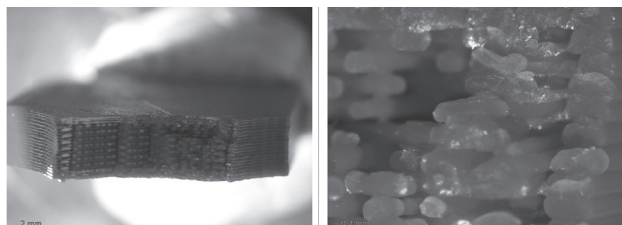
Öregített minta 4. (50%)



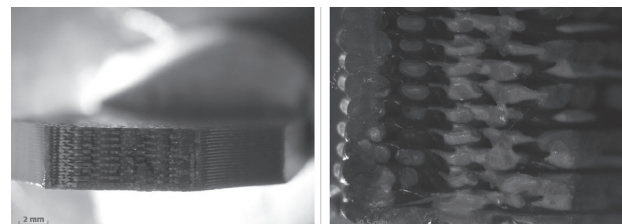
Öregített minta 5.



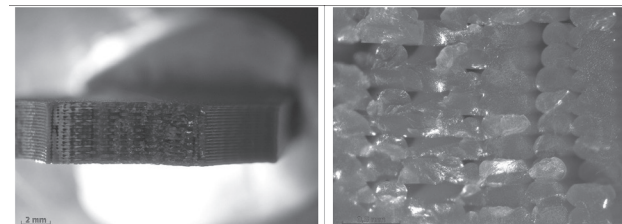
Öregített minta 6.



Öregített minta 7.



Öregített minta 8.



Ezt követően – megismételve a teszteléseket – tovább folytattuk a vizsgalatokat. Ezeket a vizsgálati eredményeket foglalja össze a 4. táblázat.

4. táblázat. PLA-minták szakítóvizsgálata – 2. sorozat

Próbatest neve	Kitöltöttség	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Jeltávolság (mm)	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
II/1.	20	9,9	4,0	71,5	689,07	17,19	4,03	0,75
II/2.	20	9,9	4,0	71,0	671,54	17,00	3,52	0,76
II/3.	20	9,9	4,1	72,1	706,49	17,34	4,17	0,75
II/4.	50	10,0	4,0	71,7	789,94	19,65	5,5	0,86
II/5.	50	9,9	4,1	72,3	780,52	19,05	4,35	0,86
II/6.	50	10,0	4,0	71,6	771,06	19,19	4,21	0,84
II/7.	80	10,0	4,1	72,7	869,69	21,02	4,35	0,94
II/8.	80	10,1	4,0	71,9	860,03	21,23	5,56	0,93
II/9.	80	10,0	4,1	72,2	848,68	20,80	5,79	0,96
II/10.	100	10,2	3,9	71,0	1508,75	38,21	5,23	1,52
II/11.	100	10,1	3,9	71,3	1520,41	38,24	3,75	1,56
II/12.	100	10,2	4,0	72,4	1491,03	36,29	6,67	1,49

A kapott vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy a 20%-os kitöltöttség kb. 17 MPa, az 50%-os kb. 19 MPa, a 80%-os 21 MPa, a 100%-os pedig 37–38MPa szakítószilárdságot eredményez.

Időközben a projekt iránt megnőtt a hallgatói érdeklődés, és két hallgató is jelezte, hogy ebből a témából szeretné írni szakdolgozatát. Így két témakiírás készült, melyek a következők:

1. Kacsó Flóra: Politejsavak bomlási folyamatainak vizsgálata – a hangsúlyt a bomlási hőmérséklet vizsgálatára helyezzük.
2. Perjési József: Politejsav-minták degradációs folyamatainak vizsgálata a páratartalom függvényében – itt a páratartalom hatását vizsgáljuk.

Kacsó Flóra szakdolgozati kísérletek:

A vizsgálatokat egy egyszerű tömegméréssel kezdtük és arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen hőmérséklet okoz tömegváltozást az adott mintákon. PLA-minták bomlásának vizsgálatát az 20; 50; 80; 100%-os kitöltöttségű mintákon végeztük el. A tesztelést – ahogy korábban már említettük – elszakított mintákon kezdtük. A vizsgálati paraméterek a következők voltak (termikus analízis, különböző páratartalom és hőfok mellett):

a) szárítás szárítószekrényben:

- i) 50°C-on 1; 2; 4 óra
- ii) 60°C-on 15 perc; 30 perc; 1 óra; 2 óra
- iii) 70°C-on 10; 20; 30 perc
- iv) 24 órára letett minták 30°C 65% RP
- v) 24 órára letett minták 40°C 75% RP

Mivel ezek alapján a legnagyobb változást a 100% kitöltöttség adta, ezeket a mintákat vittük további vizsgálatokra, így 3–3 alap minta mérése, illetve különböző hőmérsékleten és időn történt szárítás:

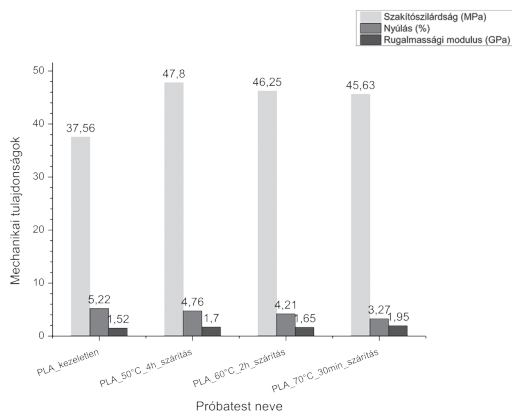
- vi) 50°C-on 4 óra szárítás
- vii) 60°C-on 2 óra szárítás
- viii) 70°C-on 30 perc szárítás

Elvégeztük a szakítóvizsgálatokat, mely során arra voltunk kíváncsiak, hogy a szárítás hoz-e mechanikai jellemzőben változást, valamint – az összehasonlítás végett – a szárított minták mellé párában kezelt mintákat rendeltünk. A kapott vizsgálati eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázat első három sora az alap, kezeletlen minta szakítóvizsgálati eredményeit mutatja, ezt követik a 60°C-on 65%-os páratartalomban 24h-n keresztül kezelt minták eredményei, majd 70°C-on 2h szárítás és az 50°C-on 4h-ig szárított minták szakítószilárdság, nyúlás és rugalmassági modulusza látható.

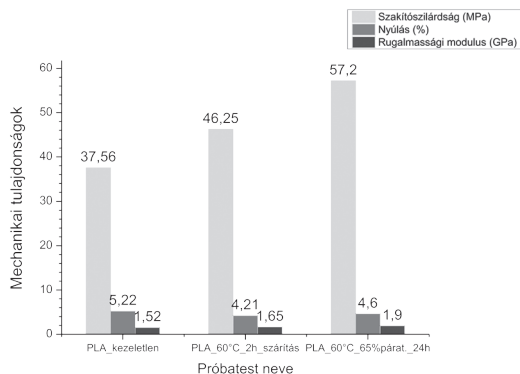
5. táblázat. PLA-alap, szárított és párában kezelt mintáinak szakítóvizsgálati eredményei

Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugal-massági modulusz (Gpa)
alap, II/10.	100	1508,75	38,2	5,23	1,52
alap, II/11.	100	1520,41	38,2	3,75	1,56
alap, II/12.	100	1491,03	36,3	6,67	1,49
60-65-100_7	100	2452,25	55,6	4,21	1,85
60-65-100_8	100	2539,01	57,6	4,71	1,87
60-65-100_9	100	2569,2	58,4	4,79	1,91
70_2hszárítás_7	100	2559,06	57,0	4,46	1,84
70_2hszárítás_8	100	2443,7	54,5	4,08	1,86
50_4hszárítás_1	100	1947,41	45,5	4,83	1,61
50_4hszárítás_2	100	2033,24	47,8	4,92	1,7
50_4hszárítás_3	100	2114,64	49,9	4,54	1,78

A PLA-minták szakítóvizsgálatát Origin-program segítségével értékeltük ki. A programmal készített oszlopdiagramokban ábrázoltuk a szakítószilárdság, a nyúlás és a rugalmassági értékeket. A 6. ábra a szárított minták diagramjait mutatja. Az első diagramból jól látszik, hogy a szárítás hatására a kezeletlenhez képest a szakítószilárdsági értékek növekedtek, míg a nyúlásértékek csökkenést mutatnak. A szárított minták tehát nagyobb szilárdságúak és kisebb nyúlásúak, mint az eredeti minta.

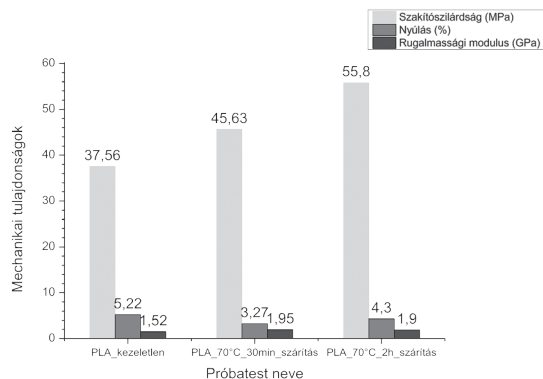
6. ábra. Szárított minták szakítóvizsgálati eredményei

A rugalmassági modulusban számottevő változás nem mutatkozik. Tehát az anyag elveszíti nedvességtartalmát, vagyis képes felvenni nedvességet a környezetéből, ami a szárítás hatására eltávozik, és így a rugalmassága csökken, rideggé válik. A 7. ábra a 60°C-on kezelt minták eredményeit mutatja, végeztünk szárítást és klímakamrás 65% páratartalomban végzett kezelést is. Az eredmények alapján a szárítás javítja a mechanikai szilárdságot, de csökkenti a nyúlást, míg a klímakamrában végzett kezelés – meglepetésre – a szárított mintához képest mind a szilárdságot, mind pedig a nyúlást javítja.

7. ábra. 60°C-on kezelt minták szakítóvizsgálati eredményei

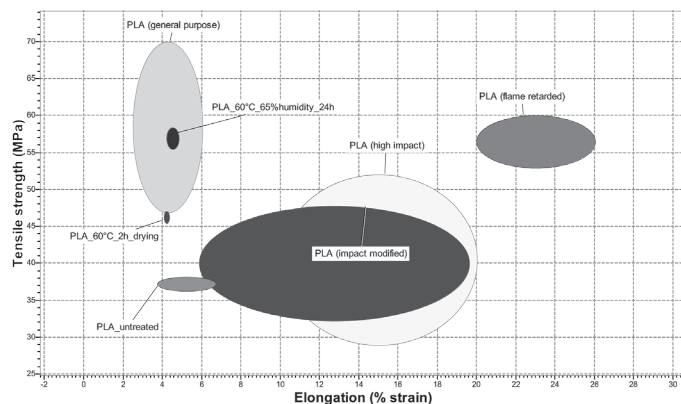
A 8. ábra pedig a 70°C-on végzett vizsgálatok eredményeit foglalja össze. A tendencia hasonló mint a 60°C-on végzettké. A szakítószilárdság növekszik, a nyúlás szintén, de a rugalmassági modulusz azonos a szárítás és a páratartalom hatására.

8. ábra. 70°C-on kezelt minták szakítóvizsgálati eredményei



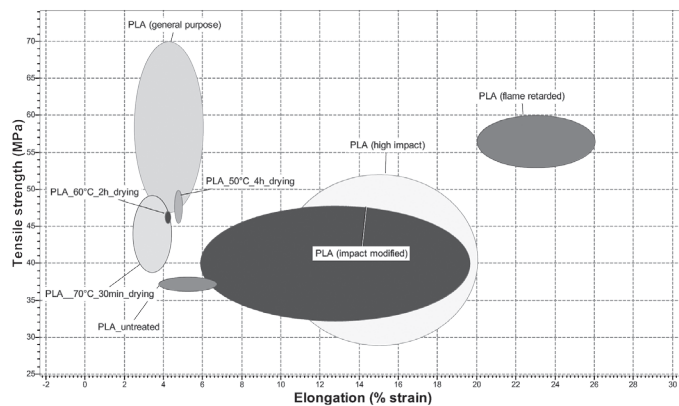
A kapott vizsgálati eredményeket összevetettük a CES EDUPACK-szoftver adatbázisával, mely közel 4000 anyagféleség teljes fizikai, kémiai és mechanikai adatait tartalmazó szoftver, és ebbe 10 db saját adatot is be lehet illeszteni. Így a kapott vizsgálati eredmények az adatbázisban lévő értékekkel összevethetők és tanulmányozhatók. A 9. ábra a 60°C-os minták adatait mutatja és hasonlítja össze a szoftver adataival. A kezeletlen értékek messze elmaradnak az általános célra gyártott PLA értékeitől, de a szárított értékek már az alsó határt elérik, míg a klímakamrás kezelt mintáké a középérték tartományban vannak.

9. ábra. PLA 60°C-os minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



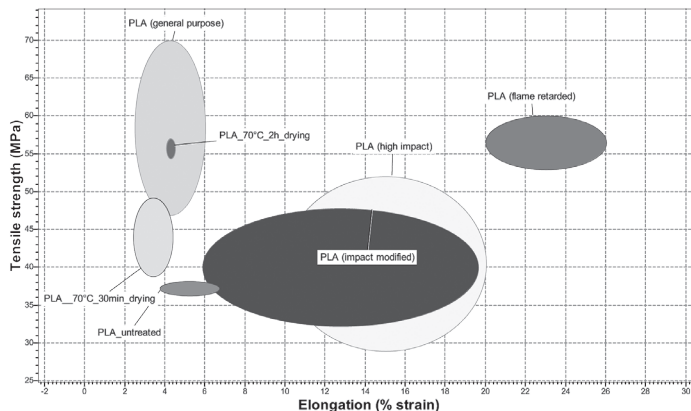
A 10. ábra a különböző hőmérsékleten és ideig kezelt minták értékeit hasonlítja össze az adatbázissal. Itt a vizsgálati értékek egyik célcsoport értékeihez sem tartoznak, az általános célra gyártottakétól alulról elérik, de nem képeznek vele metszetet.

10. ábra. Különböző hőmérsékleteken száárított PLA-minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



A 11. ábra a 70°C-os minták eredményeit mutatja az adatbázis eredményeivel összehasonlítva. A szárítási idő növelésével az értékek egyre inkább illeszkednek az általános rendeltetésű PLA értékeihez.

11. ábra. 70°C-on kezelt PLA-minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



A klímatesztes kezelést követően tovább folytattuk a 3D-nyomtatott PLA-minták szakítóvizsgálatát. A klímatesztesztet az alábbi klímakamrával végeztük el.

A klímatesztes vizsgálatok változó paraméterei a hőmérséklet és a páratartalom.

12. ábra. Binder KBWF 720 klímakamra



- Hőmérséklet-tartomány: 0–70°C
- Hőmérséklet-tartomány fénnel: 0–60°C
- Páratartalom: 10–80% RH
- Pozícionált kazetta 5 fluoreszcens csővel
- Előmelegítési lehetőség
- Szabályozható ventilátorsebesség
- Páratartalom-szabályozás kapacitív páraszenzor és gőzpára
- Intuitív érintőképernyő időszegmens és valós idejű programozás
- A mért értékek kiolvasása nyitott formátumban, mint pl. USB

Az új minták esetén elsőként a bomlási hőmérsékletnek számító 60°C-ot választottuk, ahol kétféle kitöltöttséget vizsgáltunk és 45% páratartalmat alkalmaztunk. A minták 20, illetve 80%-os kitöltöttséggel rendelkeztek. Sajnos, a korlátozott mintaszám miatt csupán 2–2 mintát teszteltünk. A kapott eredményeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. 60°C-on 45% páratartalommal kezelt minták vizsgálati eredményei

60°C 45% páratartalom	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
	60-45-20_1	20	1435,1	32,6	4,3	1,2
	60-45-20_2	20	1610,8	37,5	4,7	1,2
	60-45-80_1	80	1341,3	30,7	4,0	1,2
	60-45-80_2	80	1473,2	33,7	4,8	1,2

A 6. táblázat eredményei alapján látszik, hogy a 80% kitöltöttségű minták – viszonylag kis szórásértékkel – 30–33 MPa szakítószilárdságot mutatnak. Míg a 20% kitöltöttség esetén nagyobb eltérés van a két mérés között nagyobb eltérés van, illetve nagyobb nyúlásértékek is adódtak, úgy tűnik, mintha a nagyobb kitöltöttség ridegedést eredményezne. Összehasonlítottuk a 60°C-os 45% és 65% páratartalmú kezelések eredményeit 80% kitöltöttség esetén (7. táblázat).

7. táblázat. 60°C-on kezelt minták vizsgálati eredményei 45% és 65% páratartalom alkalmazása mellett

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
60	45	32,2	4,4
	65	42,1	4,11

Látható, hogyha a páratartalom növekszik, akkor a szakítószilárdság nő, vagyis a minta vizet vesz fel, duzzad, és nyúlásértéke csökken, tehát merevvé, ridegebbé válik (7. táblázat).

A klímatesztes kezelést követően tovább folytattuk a 3D-nyomtatott PLA-minták szakítóvizsgálatát, ami 70°C-ot és 65%-ot jelentett. A vizsgálati eredményeket a 8. táblázat foglalja össze. A vizsgálati eredmények alapján az azonos kezelést kapott minták között nincs jelentős eltérés. Így a 80%-os kitöltöttségű minták 40–41, míg az 50%-osak 33–34 MPa szakítószilárdságot mutatnak. A nyúlásértékekben, eltérő kitöltöttség mellett, számottevő eltérés nem mutatkozik.

8. táblázat. 70°C-os 65% páratartalom mellett kezelt minták vizsgálati eredményei

70°C, 65% páratartalom, 24h	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugal-massági modulusz (Gpa)
	70-65-80_1	80	1741,63	40,38	4,58	1,44
	70-65-80_2	80	1781,28	41,00	4,75	1,42
	70-65-50_3	50	1511,44	34,36	4,96	1,19
	70-65-50_4	50	1475,15	33,63	4,50	1,20

A vizsgálatok célja az volt, hogy a próbatest tesztelési hőmérsékletének növelésével és változatlan páratartalommal, 80%-os kitöltöttség mellett hogyan változnak a mechanikai jellemzők.

9. táblázat. Különböző hőmérsékletű és 65%-os páratartalommal kezelt minták vizsgálati eredményei

Páratartalom (%)	Hőmérséklet (°C)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
65	60	42,09	4,11
	70	40,69	4,67

A 9. táblázatban jól látszik, hogy a hőmérséklet növelésével a szakítószilárdság kismértékben csökken, míg a nyúlásérték növekszik. Úgy tűnik, hogy a polimer kilágyul és így a rugalmassága, nyúlása növekszik.

Folytatva a gondolatmenetet, a 3D-nyomtatott PLA-minták szakítóvizsgálatában a 70°C-os és 80%-os páratartalom-kezeléseket végeztünk 80%-os kitöltöttségű mintákon. A vizsgálati eredményeket a 10. táblázat foglalja össze. Továbbá, áttekintettük a korábbi 70°C-os minták eredményeit a most kapottakéval együtt.

10. táblázat. 70°C -os kezelésű minták vizsgálati eredményei

	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)	Rm (MPa)	A (%)
70°C, 80% páratartalom, 24h	70-80-80_5	80	1691,4	38,99	5,25	1,42	39,23	5,27
	70-80-80_6	80	1719	39,46	5,29	1,42		
70°C, 65% páratartalom, 24h	70-65-80_1	80	1741,6	40,38	4,58	1,44	40,69	4,67
	70-65-80_2	80	1781,3	41,00	4,75	1,42		
	70-65-50_3	50	1511,4	34,36	4,96	1,19	33,99	4,73
	70-65-50_4	50	1475,2	33,63	4,50	1,20		

A vizsgálatok célja az volt, hogy ha a próbatest tesztelési hőmérsékletét továbbra is 70°C-on tartjuk, de a páratartalmat 80%-ra növeljük, hogyan változnak a mechanikai jellemzők. A 10. táblázat adatai alapján a páratartalom növelésével csökken a szakítószilárdság értéke (nagyon csekély mértékben), míg a nyúlás közel 1%-kal nő. Tehát a polimer nedvességet vesz fel, duzzad.

A következő vizsgálati paraméteregyüttes az volt, hogy a vizsgálati hőmérsékletet 40°C-ra, a páratartalmat 45%, 65% és 80%-ra állítottuk be. A vizsgálati minták kitöltöttsége csupán 20% volt, a vizsgálati eredményeket a 11. táblázat foglalja össze. A páratartalom változtatásával a szakítószilárdsági értékekben érdemi eltérés nem mutatkozik. A nyúlásértékeknél nem vonható le egyértelmű következtetés a páratartalommal összefüggésben.

11. táblázat. 40°C-os minták vizsgálati eredményei

	A próba- test neve	Kitöltött- ség	Maximá- lis terhe- lés (N)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
40°C, 45% páratartalom, 24h	40-45-20_1	20	1316,16	31,04	4,25	1,15
	40-45-20_2	20	1326,14	31,32	5,46	0,82
40°C, 80% páratartalom, 24h	40-80-20_3	20	1266,35	29,77	5,04	0,93
40°C, 65% páratartalom, 24h	40-65-20_7	20	1349,15	32,21	4,63	1,13
	40-65-20_8	20	1327,34	31,79	4,54	1,12

12. táblázat. 40°C-os 20% kitöltöttségű minták szakítóvizsgálati eredményei

Hőmérsékelt	Páratartalom	Rm (MPa)	A (%)
40°C	45%	31,18	4,86
	65%	32	4,59
	80%	31,17	4,75

A 12. táblázat alapján látható, hogy a páratartalom közel duplázása a 40°C-os kezelésnél a szakítószilárdság-értéken és a nyúlásértéken sem változtat. Ez azzal magyarázható, hogy a polimerben ilyen alacsony hőmérséklet hatására nem indulnak be látványos, mérhető szerkezeti változások (mint pl. a vízfelvétel), illetve a duzzadás jelensége, mely 60–70°C-on tapasztalható.

A 60°C-os kezeléseket különböző kitöltöttség és páratartalom-értékek mellett végeztük el a 3D nyomtatott PLA-mintákon. A vizsgálati eredményeket a 13–18. táblázatok tartalmazzák. A 13. táblázatban a 20% kitöltöttségű minták vizsgálati eredményeit foglaltam össze. Jól látható, hogy a szakítószilárdság-értékek a 40%-os páratartalomról 65%-ra történő növelésével csökkentek, míg a páratartalmat tovább növelve, növekedtek.

13. táblázat. 60°C-os, 20%-os kitöltöttségű vizsgálati minták szakítóvizsgálatának eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakító-szilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	80%	20	37,5	4,835
	65%	20	30,9	4,04
	45%	20	35,0	4,48

A 80%-os kitöltöttség esetén csak kétféle páratartalmat vizsgáltam (14. táblázat). Ennek alapján a páratartalom növelése szakítószilárdság-csökkenést, a nyúlásértékben pedig kismértékű növekedést eredményez.,

14. táblázat. 60°C-os 80%-os kitöltöttségű vizsgálati minták szakítóvizsgálatának eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakító-szilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	65%	80	42,09	4,11
	45%	80	32,19	4,40

15. táblázat. Eltérő kitöltöttségű minták vizsgálati eredményei 60°C és 65% páratartalom esetén

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakítószilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	65%	20	30,90	4,04
		80	42,09	4,11
		100	57,19	4,57

A 15. táblázatban a kitöltöttség függvényében gyűjtöttem össze az adatokat, melyek a kitöltöttség növelésével egyre inkább a tömör anyag viselkedését mutatják és már nem az individuális szálak szilárdsága és szívóssága a domináns.

A korábban elvégzett szakítóvizsgálatok eredményeit rendszerezve, lehetőség nyílt absztrakt megírására a kutatási téma vizsgálataiból. Mivel a polimerek vizsgálata az egyetemen gyerekcipőben jár egy nagyobb terjedelmű cikk megírásához elegendő eredmény és tudás nem halmozódott fel, eddigi vizsgálatainkat azonban néhány absztrakttal már megmutathatjuk. Két absztrakt megírását terveztem, melyek a PLA-vizsgálatokhoz kapcsolódnak:

1. 3D-nyomtatott PLA-próbatestek viselkedése a hőmérséklet függvényében
2. 3D-nyomtatott PLA-próbatestek viselkedése a páratartalom függvényében

Az absztraktokban felhasznált vizsgálati adatokat a 16. táblázat foglalja össze, melyben azonos kitöltöttséggel készített próbatestek különböző hőmérsékleten és egy adott páratartalom mellett végzett eredményeit gyűjtöttem egybe.

16. táblázat. 80%-os kitöltöttségű minta 65%-os páratartalom mellett vizsgálva – szakítóvizsgálat-eredmények

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
70	65	80	40,69	4,67
60	65	80	42,1	4,11
kezeletlen		80	19,31	2,2
Xenonlámpás öregbített		80	20,76	3,5

A 16. táblázat eredményei alapján az látszik, hogy a polimer bomlási hőmérsékletén végzett kezelések hatására a minták közel 2x-es szakítószilárdsági értékeket mutatnak, és a nyúlás is duplázódott.

17. táblázat. 65%-os páratartalom és 20%-os kitöltöttségminták vizsgálati eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
40	65	20	32	4,59
60	65	20	30,9	4,04
kezeletlen		20	13,84	2,5
Xenon lámpás öregbített		20	14,59	3,1

A 17. táblázat eredményei alapján a hőmérséklet növelése nem változtat a szakítószilárdság-értékeken, és a nyúlásértékek is csak kismértékben változnak.

Az eddigiek alapján elmondható tehát, hogy a polimerben a szakirodalmi bomlási hőmérséklet alatt érdemi folyamatok nem játszódnak le. A bomlási hőmérsékleten és fölötté – a páratartalom megtartása mellett – mechanikai tulajdonságromlás figyelhető meg. Ennek igazolása további kísérletek és vizsgálatok elvégzését igényli.

A 18. táblázat eredményei alapján a bomlási hőmérsékleten kezelt 100%-os kitöltöttségű minta szakítószilárdsági értéke a kezeletlen mintához képest közel másfélszeres, míg a nyúlásérték kb. 0,8%-kal növekedett.

18. táblázat. 60°C-os és 65% páratartalom mellett kezelt minták vizsgálati eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
60	65	100	57,19	4,57
kezeletlen		100	38,28	3,8
xenonlámpás öregbített		100	34,78	4

A kutatómunka az alábbi paraméterekkel folytatódott:

19. táblázat. Vizsgálati paraméterek mátrixa

Hőmérséklet (°C)	Kitöltöttség (%)	Páratartalom (%)					
40°C	20	30	45		65		80
60°C	20	30	45	55	65	75	80
60°C	80		45		65		80
70°C	80		45		65		80

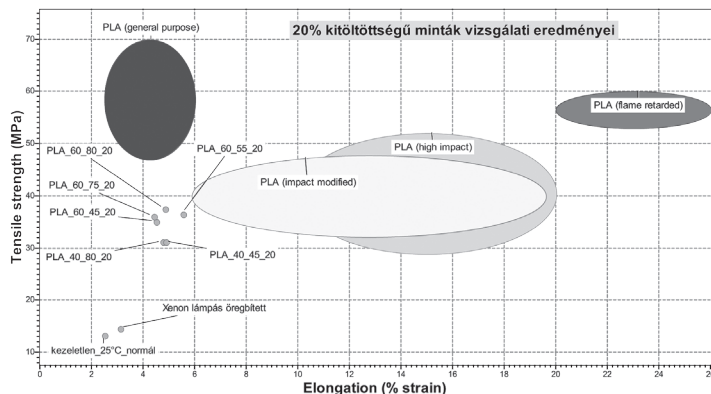
A további vizsgálatokat 60°C-on, 30–55–75% páratartalom mellett, 20%-os kitöltöttségű mintákon végeztük. Mindegyik paraméteregyüttesnél 2–2 mintát teszteltünk, hogy a vizsgálati eredmények reprodukálhatóságát is ellenőrizni tudjuk. A vizsgálati eredményeket a 20. táblázat foglalja össze.

20. táblázat. Vizsgálati eredmények 20%-os kitöltöttségű minták esetén

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
Kezeletlen	25	Normál	20	13,4	2,5
Öregített			20	14,6	3,1
PLA_60_80_20	60	80	20	37,52	4,84
PLA_60_30_20	60	30	20	35,32	3,87
PLA_60_30_20	60	30	20	16,09	2,95
PLA_60_45_20	60	45	20	35,04	4,48
PLA_60_75_20	60	75	20	36,08	4,40
PLA_60_75_20	60	75	20	34,99	5,25
PLA_60_55_20	60	55	20	36,53	5,54
PLA_60_55_20	60	55	20	36,47	5,21

A vizsgálati eredmények alapján, ha a kitöltöttséget és a vizsgálati hőmérsékletet változatlanul hagyjuk, és csak a páratartalom növekszik, a következő tendencia rajzolódik ki a szakítóvizsgálat eredményeként kapott szakítószilárdság és szakadási nyúlás eredményei alapján.

13. ábra. Ashby-diagram (CES EDUPACK2019 szoftver alkalmazásával) a 20%-os kitöltöttségű minták esetén



A 13. ábrán jól látszik, hogy a 40°C-on végzett vizsgálatok esetén a páratartalom-növelés nem indukál semmilyen szilárdsági és szívóssági jellemzőváltozást a mintákban, ezzel szemben a 60°C-on elvégzett vizsgálatok esetén a páratartalom növelésével egy kismértékű szakítószilárdság-növekedés figyelhető meg. Az 55%-os páratartalommal kezelt minta kilóg a sorból, abban a tekintetben kilóg a sorból, hogy a szilárdságnövekedés mellett kb. 1–1,5% nyúlás növekmény is megfigyelhető. Ha mind a 40, mind a 60°C mintákat a kezeletlen és az öregbített minták vizsgálati eredményeihez hasonlítjuk, akkor a kezdeti kb. 15 MPa szakítószilárdság duplájára vagy a 60°C-os minták esetén közel háromszorosára nőtt, míg a szakadási nyúlás-értékek is duplájára változtak. Tehát a PLA-minták növelt hőmérséklet és páratartalom mellett vízfelvételre képesek, minek eredményeként a szálakból 3D-nyomatással készített minták közel tömbi anyagként kezdenek el viselkedni, és ennek eredményeként a szilárdsági és szívóssági jellemzőkben javulás detektálható.

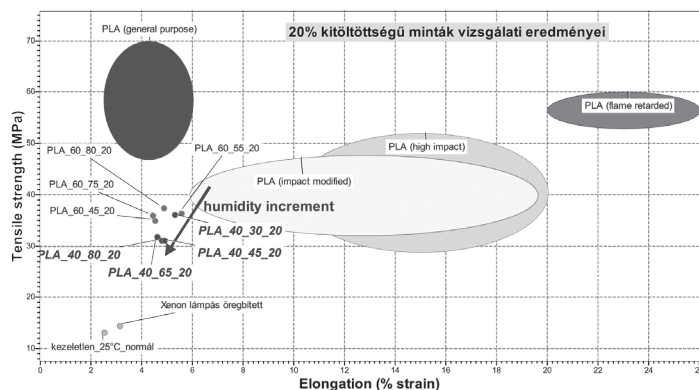
A 40°C-on végzett kísérleteket kiegészítettük a 30%-os és a 65%-os páratartalommal kezelt mintákkal, a vizsgálati eredményeket a 21. táblázat foglalja össze.

21. táblázat. 40°C-on végzett vizsgálati eredmények összefoglalása

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
PLA_40_45_20	40	45	20	31,18	4,86
PLA_40_80_20	40	80	20	31,17	4,75
PLA_40_30_20	40	30	20	36,3	5,27
PLA_40_65_20	40	65	20	32	4,59

A 21. táblázat adatai jól mutatják, hogy a korábban vizsgált 45 és 80%-os páratartalom közel azonos szilárdsági és szívóssági értékeket eredményezett, míg a vizsgálatokat 30%-os páratartalomban kivitelezve a szilárdsági értékek nagyobbak. Ugyanez mondható el a szívóssági jellemzőre, azaz a szakadási nyúlásra is.

14. ábra. Ashby-diagram a 40°C-os minták vizsgálati eredményeire



A vizsgálatot 65%-os páratartalom esetén is megvalósítva már lényeges csökkenés figyelhető meg, mely érték belesimul a csökkenő tendenciába. Tehát 40°C-on a növekvő páratartalom rontja a szakítószilárdság és szakadási nyúlás-értékeket és csökkenés detektálható.

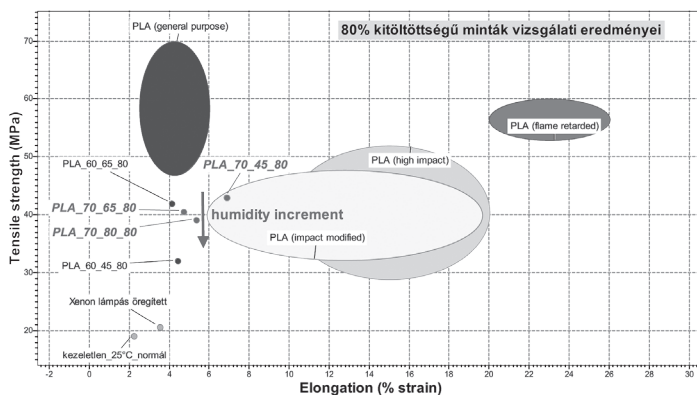
A 70°C-on végzett kísérletekkel folytattuk a kutatást, melyeknél a 45–65–80% páratartalmat alkalmaztuk, a minták pedig a korábbi 20%-os kitöltöttség helyett 80%-osak voltak. A vizsgálati eredményeket a 22. táblázat foglalja össze, mely a szakítószilárdság és szakadásnyúlás-értékeket helyezi középpontba.

22. táblázat. 70°C-os kísérletek vizsgálati eredményei

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
PLA_70_45_80	70	45	80	43,1	6,82
PLA_70_80_80	70	80	80	39,23	5,27
PLA_70_65_80	70	65	80	40,69	4,67
PLA_70_65_50	70	65	50	33,99	4,73

A 22. táblázat eredményei alapján megállapítható, hogy az azonos kitöltöttségű, és azonos hőmérsékleten végezett, de páratartalmában folyamatosan növelt terhelést kapott mintáknál a szakítószilárdság csökken, és míg a szakadási nyúlás egy V-alakú trendet rajzol ki. Ez utóbbi tényleges igazolására további vizsgálatok szükségesek, mert jelen esetben csak három vizsgálati pont áll rendelkezésre. Még további legalább kettő köztes páratartalom szükséges az állítás megerősítésére.

15. ábra. Ashby-diagram a 70°C-on végzett kísérletek eredményeire



A fenti csökkenő tendencia szépen látszik az Ashby-diagramon (15. ábra) is, továbbá a nyúlásértékek V-alakzata is kirajzolódik.

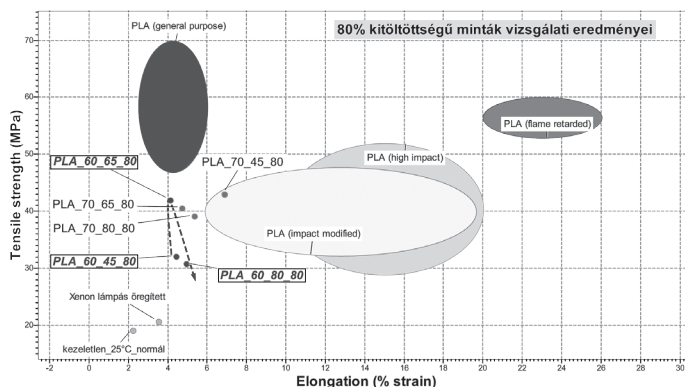
A 80%-os kitöltöttségű minták elemzését is elvégeztük. Ezt a kitöltöttséget csak azoknál a klímatesztes vizsgálatoknál alkalmaztuk, melyek a szakirodalomban közölt 60°C vagy a feletti hőmérsékletet, jelen esetben 70°C-ot kaptak. A páratartalom széles skálán mozgott, melyet a 23. táblázat foglal össze.

23. táblázat. 70°C-os kezelésű minták vizsgálati eredményei

Minta neve	Állapot		Kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)
	hőmérséklet	Páratartalom			
Kezeletlen	25	Normál	80	19,3	2,2
Öregített			80	20,8	3,5
PLA_70_65_80	70	65	80	40,7	4,7
PLA_70_80_80	70	80	80	39,2	5,3
PLA_60_45_80	60	45	80	32,2	4,4
PLA_60_65_80	60	65	80	42,1	4,1
PLA_60_80_80	60	80	80	30,9	4,9

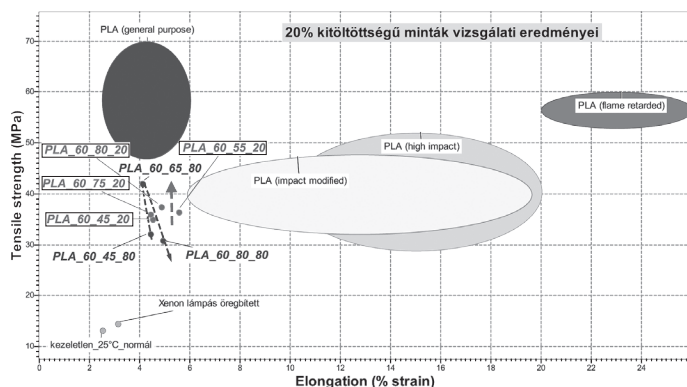
A 23. táblázat adatai alapján látszik, hogy a páratartalom ezeknél a mintáknál 45–65–80% volt.

16. ábra. Ashby-diagram 60°C-on kezelt és 80%-os kitöltöttségű minták esetén



A 16. ábra Ashby-diagramján a kerettel kiemelt minták vizsgálati eredményei egy fordított V-alakot írnak le, mely azt jelenti, hogy a 60°C-on a 80%-os kitöltöttségű mintáknál eddig elvégzett klímatesztek alapján a páratartalom növelésével a minták szilárdsági jellemzője növekszik, majd a páratartalom további növelésével lecsökken a 45%-os páratartalmú minta értékére. Természetesen, hogy a trendet igazolni lehessen, a további vizsgálatok elvégzése is indokolt.

17. ábra. 60°C-on végzett vizsgálatok összefoglaló Ashby-diagramja



A 60°C-os minták elemzését is elvégeztük. Az 17. ábra foglalja össze. A kerettel kiemelt 20%-os kitöltöttségű mintáknál a páratartalom növelésével a szakítószilárdság-értékek nőnek, míg a 80%-os minták esetén a korábban ismertetett fordított V-alak rajzolódik ki.

Ha azonos paraméterekkel kezelt, de eltérő kitöltöttségű mintákat veszünk alapul, akkor pl. PLA_60_45_20 és PLA_60_45_80 esetén nagyobb a 20%-os kitöltöttségű minta szakítószilárdság-értéke, ami azzal magyarázható, hogy a 20% esetén a mintában elegendő üres tér áll rendelkezésre, hogy a szálak duzzadni tudjanak, azaz nedvességet tudjanak felvenni. A 80% esetén ez nem áll fenn, és egy belső feszültség indukálódik, ami ridegíti az anyagot és így kisebb húzóerőnél már elszakad. A PLA_60_80_20 és PLA_60_80_80 mintáknál ugyanez az összefüggés látszik

Összefoglalás

A PLA-minták klímatesztes vizsgálatait az alábbi táblázatban található paraméterekkel végeztük el.

24. táblázat. A klímatesztes vizsgálatoknál használt vizsgálati paraméterek

Hőmérséklet (°C)	Kitöltöttség (%)	Páratartalom (%)					
40°C	20	30	45		65		80
60°C	20	30	45	55	65	75	80
60°C	80		45		65		80
70°C	80		45		65		80

A vizsgálatokból az alábbi következtetések vonhatók le:

- A polimer a bomlási hőmérséklet alatt (60°C) a páratartalom függvényében érdemi mechanikai jellemzőkben nem mutat változást.
- A 60°C-on, 20% kitöltöttséggel készített minták esetén a páratartalom függvényében egy minimumos görbe rajzolódik ki, melynek a minimuma 65% páratartalomnál van, ennek tényleges igazolása további vizsgálatokat és kísérleteket igényel.
- A 60°C-os, 80% kitöltöttségű minták esetén a páratartalom növelése szilárdságnövekedést mutat, ennek tényleges igazolása további vizsgálatokat és kísérleteket igényel.

- A 70°C-on végzett vizsgálatok esetén a páratartalom változtatása 65%-ról 80%-ra nem okoz érdemi változást a mechanikai tulajdonságokban, a kitöltöttségben megmutatkozó különbség a mechanikai jellemzőket követi.
- 40°C-on elvégzett kísérleteknél a négy különböző páratartalommal végzett vizsgálatból megállapítható, hogy a PLA-mintáknál azonos kitöltöttség esetén, a szakítószilárdság a páratartalom növelésével csökkenő tendenciát mutat. Míg a szakadási nyúlás-értékeknél szintén csökkenés detektálható, de ezek az értékek a 80%-os páratartalomnál elmozdulnak a jellemző növekedési irányba. Vajon a páratartalom további növekedése emelkedést indukálna a szilárdsági jellemzőkben is? Sajnos az egyetemen lévő készülék lehetőségeit kimagoltuk.
- 60°C-on végzett vizsgálatok esetén a 20%-os kitöltöttségnél egy teljes vizsgálati sort alkalmaztam, a teszteleseket hat különböző páratartalom mellett hajtottam végre. A vizsgálati eredmények alapján az látszik, hogy a páratartalom növelésével a szilárdsági jellemző is növekszik. (Megjegyzés: a 30%-os páratartalomnál két nagyon eltérő eredményt kaptunk, így ezt a továbbiakban nem vettem figyelembe, mert további tesztelés szükséges, hogy egyértelműen látható legyen melyik érték adja a valós jellemzőt.). A szakadási nyúlásoknál a kezdeti kimértékű növekedést kimértékű csökkenés követ. Egyértelmű trend nem állítható fel, tulajdonképpen az mondható, hogy a páratartalom növelése nem okoz jelentősebb változást a szakadási nyúlás értékében.
- 60°C-on, 80%-os kitöltöttségnél a szakítószilárdságnál – a kapott eredmények alapján – egy fordított V-alak rajzolódik ki, a kapott eredmények alapján, de a tendenciát csak további eredményekkel lehet egyértelműen igazolni.
- 70°C-os tesztelés után a páratartalom növelésével a szakítószilárdság értékeiben egyértelmű csökkenés mutatkozik, ami arra utal, hogy a felvett nedvesség jelentős belső feszültséget indukál az anyagban és ez ridegíti a 3D-nyomtatott próbatesteket. Mindez a szilárdság csökkenésében mutatkozik meg. A szakadási nyúlásnál egy V-alak rajzolódik ki, melynek igazolása további vizsgálatokat igényel.

Köszönetnyilvánítás

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.

Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek alkalmazási lehetőségei

Összefoglalás: Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része, elsősorban az ember-számítógép, a megjelenítő és elemző interfészek, továbbá a virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások és kutatási irányok kerülnek összefoglalásra.

Kulcsszavak: Ember-számítógép-interfész; VR; megjelenítő és elemző interfész.

Abstract: This article summarizes some of our research carried out in the project named EFOP-3.6.1-16-2016-000003 „Long-term strengthening of R & D & I processes at the University of Dunaújváros”, mainly human-computer and visualization and analysis interfaces, and research and research directions and related to the topic of virtual reality.

Keywords: Human-computer interface; VR; display and analysis interface.

Bevezető

Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része, elsősorban az ember-számítógép, a megjelenítő és elemző interfészek, továbbá a virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások és kutatási irányok kerülnek összefoglalásra. Az egyes kutatási témákat a kutatásban részt vett kutatók foglalják össze.

* Dunaújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet
E-mail: kovari@uniduna.hu

** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: katonaj@uniduna.hu

*** ISD Dunafer Zrt.
E-mail: wizner.krisztian@isd-dunafer.hu

**** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: ujbanyit@uniduna.hu

***** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: nagy.balint@uniduna.hu

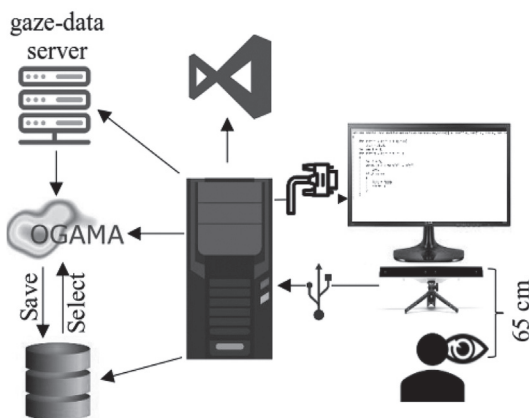
***** Széchenyi Egyetem
E-mail: berki.borbala@sze.hu

***** Széchenyi Egyetem
E-mail: sudar.anna@sze.hu

Eye-tracking alkalmazása programozási technológiák összevetésének és a forráskód érthetőségének, olvashatóságának és karbantarthatóságának vizsgálatára (Katona József)

A szemmozgáskövető rendszerek lehetőséget kínálnak olyan komplex kognitív folyamatok megfigyelésére és tanulmányozására, mint a programozás és az implementáció. Az egyre növekvő programrendszerek következménye, hogy a szoftverfejlesztőknek egyre több programozási technológiát kell hatékonyan alkalmazni. Az 1. ábra egy olyan szemmozgáskövető rendszert és annak elemeit illusztrálja, amelyek együttműködve lehetővé teszik az olyan összetett kognitív folyamatok vizsgálatát, mint a programozás, az elérhető programozási technológiák értelmezhetőségének összevetése, a forráskód-olvasás és -értelmezés, valamint az eltérő hibakeresési módszerek hatékonyságának vizsgálata.

1. ábra. A szemmozgáskövető rendszer és komponenseinek sematikus ábrája



EYE-TRACKING ALKALMAZÁSA A PROGRAMOZÁS-OKTATÁSÁBAN, VALAMINT
A DEBUGGOLÁSI TECHNIKÁK ELEMZÉSE CÉLJÁBÓL

Napjainkban a különböző programozási tárgyak oktatása egyre nagyobb kihívást jelent, mivel a növekvő felhasználói igények miatt újabb és újabb paradigmákat és technológiákat kell a diákok számára átadni.

A felsőoktatásban mostanra olyan hallgatók tanulnak, akik már a digitális világban születtek, azonban a különböző programozási tárgyak teljesítésének sikeressége azonban elmaradást mutat. A közelmúltban az ember-számítógép-interfészalapú kutatások egyre több tudományterületen jelentek meg és az oktatást is forradalmasíthatják. Az ilyen jellegű interfészek egyfajta támogató rendszerként is segíthetnék az oktatókat a hatékonyabb tudásanyag átadásában, a tanulókat pedig az otthonaikban támogathatnák a megfelelő tanulási kultúra kialakításában. Az [1], [2], [3] tanulmányok a szemmozgáskövető rendszerek alkalmazhatóságát vizsgálták programozási feladatok tekintetében, melynek során a helytelenül működő algoritmusok hibáinak feltárása és kijavítása alatt megfigyelésre, rögzítésre, valamint kiértékelésre kerültek a szemmozgás-paraméterek. A vizsgálat során néhány, a tesztalanyokra jellemző paraméterek alkalmazásával két csoport került kialakításra. Az első csoport debuggolás során inkább az apróbb módosításokat és a gyakoribb fordítások és futtatások technikáját alkalmazta (ami a programozást tanuló diákokra amúgy is jellemző), míg a második csoport tagjai nagyobb hangsúlyt fektettek az értelmezésre. A statisztikai kiértékelés során a két csoport szemmozgásainak követésére jellemző paraméterek, valamint ezen csoportok hatékonyságai kerültek elemzésre. A 2. ábra egy véletlenszerűen kiválasztott tesztalanytekintet-útvonal térkép illusztrációja implementációs hiba keresése közben.

2. ábra. Véletlenszerűen kiválasztott tesztalanytekintet-útvonal térkép illusztrációja implementációs hiba keresése közben

```
private static void ModifiedInsertionSort(int[] A)
{
    int key = 0;
    int i = 0;

    for(int j = 1; j < A.Length-1; j++)
    {
        key = A[j];
        i = j - 1;
        while( i >= 1 && A[i] > key )
        {
            A[i + 1] = A[i];
            i = i - 1;
        }
        A[i] = key;
    }
}
```

[1] Kővári, A.–Katona, J.–Costescu, C. (2020): Evaluation of Eye-Movement Metrics in a Software Debugging Task using GP3 Eye Tracker. *Acta Polytechnica Hungarica*. 17. (2)

[2] Katona, J. et al. (2019a, October): The Examination Task of Source-code Debugging Using GP3 Eye Tracker. In: *2019 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 329–334.

[3] Katona, J. et al. (2019b, October): Recording Eye-tracking Parameters during a Program Source-code Debugging Example. In: *2019 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 335–338.

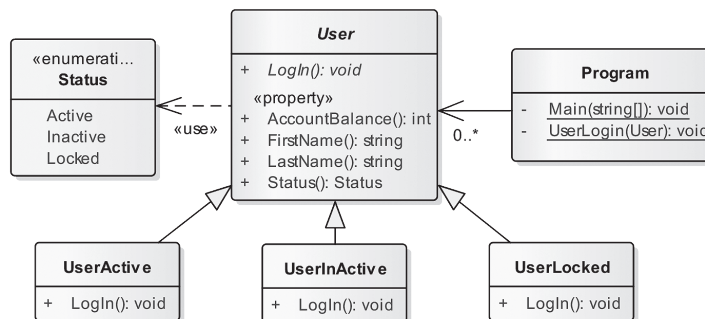
[4] Katona, J. (2021): Clean and Dirty Code Comprehension by Eye-tracking Based Evaluation using GP3 Eye Tracker. *Acta Polytechnica Hungarica*. In press.

[5] Katona, J. et al. (2020, September): Using eye-tracking to examine query syntax and method syntax comprehension in LINQ. In: *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 437–444.

EYE-TRACKING ALKALMAZÁSA PROGRAMOZÁSI TECHNOLÓGIÁK ÉRTHETŐSÉGÉNEK ÉS OLVASHATÓSÁGÁNAK ÖSSZEVETÉSE CÉLJÁBÓL

Katona J. (2021) [4] megjelenés alatt lévő cikke a tiszta kód technikájának hatékonyságát vizsgálja és veti össze az ebben a technikában megfogalmazott elvek nélkülözésével előállított dirty code-al. A hagyományos tudásszintfelmérő tesztek és a szubjektív vélemények mellett figyelemterkép és tekintetútvonal elemzésével és szemmozgás-paraméterek mérésével és kiértékelésével meghatározásra került a megvalósított kód olvashatósága és érthetősége. A 3. ábra az egyik tisztakód technikáját alkalmazó forráskód UML-osztálydiagramját ábrázolja.

3. ábra. Az egyik tisztakód technikáját alkalmazó forráskód UML-osztálydiagramja



Katona J. és szerzőtársai (2020, September) [5] cikkükben a C# programozási nyelv egyik lehetőségének a Language-Integrated Query adatsztraktációs rétegének két típusát, a query és method-syntax-alapú lekérdezések olvashatóságát és érthetőségét elemzi tudásszintfelmérő tesztek, valamint szemmozgás-paraméterek kiértékelése útján. Az egyes lekérdezések jól elhatárolt elemezhetősége tekintetében AOI-területek kerültek kijelölésre (4. ábra). A cikkben leírt eredmények alapján kijelenthető, hogy a szemmozgáskövető rendszerek alkalmazása összetett kognitív folyamatok vizsgálata során jól alkalmazható és további kiegészítő információkkal is szolgálhat a fejlesztők vagy kutatók részére a legérthetőbb technológia kiválasztása céljából.

4. ábra. AOI-terület meghatározása method-syntax-alapú LINQ-lekérdezés esetében

```
double minimumAverageScore = 70;
var mStudents = students
    .Select(x => new { AverageScore = x.Scores.Average(), FullName = x.FirstName + " " + x.LastName, x.ID })
    .Where(student => student.AverageScore > minimumAverageScore)
    .OrderBy(student => student.AverageScore)          AOI
    .Select(student => new { StudentID = student.ID, student.FullName, student.AverageScore } );

foreach (var student in mStudents)
    Console.WriteLine("{0}, {1}, {2}", student.StudentID, student.FullName, student.AverageScore);
```

Megjelenítő interfészek optimalizálását szolgáló matematikai módszerek – alakzatok pakolása (Joós Antal)

Alakzatok eltolt példányival történő pakolásról akkor beszélünk, amikor az alakzatokra olyan eltolásokat alkalmazunk, hogy az eltolt példányoknak nincs közös belső pontjuk. A diszkrét geometriában gazdag irodalmat találhatunk a kongruens körök pakolásáról. A legsűrűbb körpakolás bizonyításában, amikor megmutatják, hogy a jelölt körpakolásnál sűrűbben nem lehet a síkon köröket pakolni, kulcsszerepet játszik a Hajós lemma [6]. Ennek a kulcsfontosságú lemmának két lehetséges általánosításával foglalkozik a Bezdek és Joós cikke [7].

A d-dimenziós euklideszi tér hányadostere egy d-rangú ráccsal egy tórusz. Ha a 2 dimenziós (négyzet) tórusz alakzatai körök, akkor Melissen, Heppes, Dickinson et al., Brandt et al., Musin et al. és Przeworski munkáiban sok eredményt találunk. A 3 dimenziós (kocka) tóruszon pakolásról nincsenek eredmények [8].

A tóruszon pakolás kiterjesztése az egész térre egy térbeli periodikus pakolás, amit egy véges térrésszel jellemzünk. Ezzel a módszerrel az egész térre vonatkozó periodikus pakolásokat tudunk megjeleníteni a képernyőn.

Az egész tér helyett egy véges térrészben (konténerben) is pakolhatunk alakzatokat. Ha a konténer a szabályos, egységoldalú háromszög, akkor Graham és Lubachevsky, Groemer, Orel, valamint Melissen munkáiban találunk eredményeket legfeljebb 12 vagy $k(k+1)/2$ darab kongruens kör pakolására. A 13 kör pakolására először Melissen (1993), majd Garham és Lubechevsky (1995) fogalmazott meg sejtést. Ezeket a sejtéseket sikerült bizonyítani Joós (2020a) cikkében.

[6] Molnár, J. (1965): Kreislagerungen auf Flächen konstanter Krümmung. *Math. Ann.* 158. Pp. 365–376.

[7] Bezdek, A.–Joós, A. (2020): Area minimization of special polygons. *Acta Math. Hungar.* 160. (1.) Pp. 33–44.

[8] Joós, A.–Nagy, B. (2020): Optimal packings of 2, 3 and 4 equal balls into a cubical flat 3-torus. *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana.* 13. Pp. 335–340.

[9] Joós A. (2019): On covering the square flat torus by congruent discs. *Australasian Journal of Combinatorics*, Volume 75. (1.) Pp. 113–126.

[10] Bezdek A.–Guan Z.–Hujter M.–Joós A. (2021): Cubes and Boxes Have Rupert's Passages in Every Nontrivial Direction. *American Mathematical Monthly*, accepted.

Ha a képernyő nem téglalap, hanem pl. háromszög alakú, akkor a cikk segíthet a képernyőn történő gazdaságos megjelenítésben. Hasonló téma Joós (2020b, 2021), amikor a konténer egy téglalap vagy d-dimenziós téglatest és a bepakolandó alakzatok különböző méretű négyzetek vagy d-dimenziós kockák.

A fenti problémák duálisa a következő. Adott egy halmaz, amit le szeretnénk fedni alakzatokkal. Az alakzatok akkor fedik a halmazt, ha az alakzatok uniója tartalmazza a halmazt. A Joós (2019) [9] cikkben a négyzet tórusz fedését találjuk 1, 2 illetve 3 körrel. A tórusz fedésének kiterjesztése az egész térre egy térbeli periodikus fedés, amit egy véges térrésszel jellemezünk. Ezzel a módszerrel az egész térre vonatkozó periodikus fedéseket tudunk megjeleníteni a képernyőn.

A 17. századig visszanyúló gyökerekkel rendelkező Rupert-probléma, amikor egy kockából kivájunk egy olyan lyukat, hogy a kocka ne essen szét darabokra, de egy nagyobb kockát átdughassunk a kivájt lyukon. A kérdés az, hogy mennyire lehet felnagyítani az átdugandó kockát (ez az arány a kockánál a Nieuwland-konstans), vagy esetleg, a kocka helyett, milyen más testre igaz ez a tulajdonság. A (Bezdek et al. 2021) [10] cikkben azt sikerült megmutatni, hogy a kocka minden nem triviális irányból rendelkezik ezzel a tulajdonsággal. A cikkben ennek egyik alkalmazása, hogy a Nieuwland-konstans keresésénél elég a kockában egy maximális négyzetet keresni (amin átdugjuk a nagyobb kockát). A cikk segíthet abban, hogyan lehet ügyes trükkökkel minél nagyobb alakzatot megjeleníteni a képernyőn.

Megjelenítő és elemző interfész az acélöntés folyamatának vizsgálatára (Wizner Krisztián)

Kutatásunkban az acélgyártás egyik folyamatát, a folyamatos acélöntést, azon belül a nem állandósult szakaszainak hatását vizsgáltuk az öntött brammából hengerelt lemeztermék leminősülésére. A folyamatos öntés ipari gyakorlatában elkerülhetetlenek az állandósult állapotot megzavaró események. Ezen szakaszok vizsgálatát több tényező is nehezíti. A folyamatkövetés szemlélete alapján a rögzített nagy mennyiségű adat időalapon kerül letárolásra, ami nem ad könnyen értelmezhető információt arról, hogy az adott esemény az öntött szál mely szakaszát, milyen mértékben érintette.

Az öntési folyamat adatainak időalapról (folyamatkövetési szemlélet) öntőtthossz-alapra (termék-szemlélet) történő átalakításával pontosabb kép adható a nem állandósult szakaszok elhelyezkedésével kapcsolatosan, ezáltal pontosabban vizsgálhatóvá válik hatásuk az öntött szálra, azaz a metallurgiai fázis végtermékét jelentő brammára.

A brammák azonosítása a diszkrét adaggyártás adminisztrációs szempontjainak figyelembevételével történik, mely alapján egy bramma kizárólag egy adaghoz tartozhat. Ez a megközelítés a folyamatos öntés vizsgálatánál csak korlátozottan alkalmazható. A folyamatos acélöntés technológiájából kifolyólag az egymás után öntött adagok a pufferszerepet betöltő közbenső üstben keverednek, ezért ilyen esetekben az érintett szálszakasz jellemzői a két adag összetett tulajdonságaitól függenek. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a vevői igények alapján összeállított brammahosszok (brammatömegek) az esetek túlnyomó többségében nem feleltethetők meg pontosan egy-egy adag ~135t tömegének. Emiatt elkerülhetetlen, hogy az adag kezdeti vagy végbrammájának egy része másik adagból kerüljön leöntésre.

A hengerelt termékek metallurgiai jellegű leminősüléseinek vizsgálatához a fent említett folyamatos öntési jellegzetességek miatt egy öntés- (szekvens-) szemléletű adatkezelés kialakítása szükséges, melynek segítségével minden brammához egyértelműen hozzárendelhető a rá jellemző adaggyártási, finomítási és öntési körülmény.

Az acélgyártás metallurgiai folyamatai nagyon összetettek és számos tudományterületet érintenek. A folyamatok során képződő nagy mennyiségű adat több szempontból történő értelmezése és értékelése nagy kihívás elé állítja a szakembereket. A leminősülések okainak azonosításában különösen nagy kihívást jelent, hogy az egymást követő technológiai fázisok (acélgyártás, finomítás, folyamatos öntés, megleghengerlés) gyakran elfednek vagy éppen felszínre hoznak olyan leminősülési okokat, amelyek más technológiai fázisban keletkeztek. Ilyen hibák például a megszilárdulási fázisban kialakuló felszín alatti repedések, melyek a hengerlési fázisban, az alakítás hatására akár el is tűnhetnek, de a hevítő kemencében akár a felszínre is kerülhetnek, és így leminősülést okozhatnak.

A kutatás elsődleges célja egy tudományos alapokon nyugvó, komplex adatfeldolgozó és adatvizualizációs informatikai rendszer kialakítása, mely támogatást nyújt a hengerelt termékben megjelenő metallurgiai hibák okainak feltárásához, valamint – az acél minőségének javítása érdekében – megteremti az alapot a komplex vizsgálati módszerek kidolgozásához.

A rendszerrel szemben támasztott követelmények:

- Adaptálhatóság (kis átalakítással más kohászati üzemben is alkalmazható legyen).
- Bővíthetőség (új vizsgálati szempontokkal).
- Ingyenes, nyílt forráskódú programozási eszközök használata.
- Ipari informatikai infrastruktúrába illeszthetőség biztosítása.
- Platformfüggetlen (webes) adatvizualizáció.
- Nagy szabadságfokú, dinamikus adatmegjelenítési lehetőség.

[11] Wizner K.–Kővári A. (2020a): Metallurgiai eredetű hibák reklamáció-kivizsgálását támogató szakértői rendszer kialakítása az ISD DUNAFERR Zrt. technológiájában. *MagyarAcél*. IV. (1.) Pp. 44–48.

[12] Wizner, K.–Kővári, A. (2020b): Root cause analysis of metallurgical defects in continuous cast steel slabs at ISD DUNAFERR Zrt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, P. 903.

[13] Wizner, K.–Kővári, A. (2020c): Novel concepts for establishing expert support systems to investigate the defect occurring in metallurgical phases in the technology of ISD DUNAFERR Zrt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, P. 903.

[14] Wizner, K.–Kővári, A. (2020d): Effect of the Production Conditions of Continuously Cast Steels on the Degree of Hot Rolled Product Downgrading. *Acta Materialia Transilvanica* (EN), 3. (1.) Pp. 55–59.

- Szakemberek közötti kooperatív munka biztosítása (megoszthatódiagram-nézetek).
- Egységes vizsgálati szempontok kialakítása tegye lehetővé (pl. leminősülések).
- A szakemberek terhelésének csökkentése az adatok elő-feldolgozása és vizualizációja által.

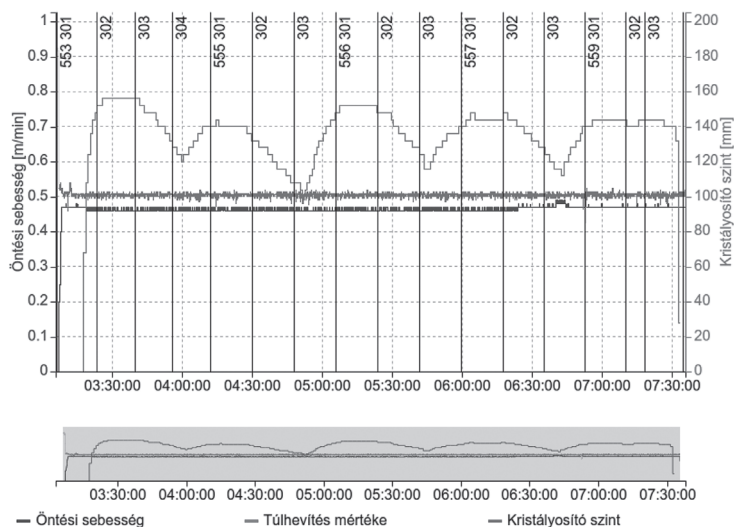
Az acélgyártás, az üstmetallurgiai kezelés és a folyamatos öntés adatai, valamint a brammák összetételi minősítésének feltételei az acélmű Oracle-adatbázisából származnak. A brammákból hengerelt termékek (lemez, tekercs) leminősülési adatai a vállalatirányítási rendszer részét képező SAP/R3 adatbázisából származnak. Az adatok elő-feldolgozására a legkézenfekvőbbnek a Python nyelv alkalmazása mutatkozott, a későbbiekben azonban az adatfeldolgozás kódja az üzem kérésére átírássá került az acélmű Oracle adatbázisán futó PL/SQL-kódra. Az adatfeldolgozás programozásával párhuzamosan folyt az acélmű PHP-szerverén futó webes megjelenítő programozása – szintén az üzem kérésére – PHP és JavaScript nyelveken.

Az alábbi feladatok a Python nyelv eszközeivel kerültek implementálásra (numpy, scipy, pandas, matplotlib, sklearn, statmodels-csomagok):

- Nem állandósult öntési szakaszok kívülállóérték-határainak meghatározása (boxplot alapján).
- Szelvénymérettől függő határértékek korrekciója lineáris regresszió segítségével.
- Statikus adatábrázolás.
- Leminősülési arányok különbözőségének ellenőrzése z-teszttel.

A kutatások egyes eredményeit a Wizner és Kővári (2020 a, b, c, d) [11], [12], [13], [14] cikkek foglalják össze. Az 5. ábrán az elemzést lehetővé tevő alkalmazás felhasználói felületének részlete látható.

5. ábra. Öntési diagramot megjelenítő felület részlete



A hengerelt terméket ért körülmények a rendszer segítségével automatizálhatóan, egyben válnak vizsgálhatóvá a nyersacél legyártásától egészen a hengerlési fázis befejezéséig. Az elemzett adatok felhasználásával a jelenlegi lehetőségekhez képest sokkal mélyebb betekintés nyerhető az öntés technológiai folyamataiba, a minőséget befolyásoló hatások könnyebben azonosíthatóak. A termékszempontú (öntőtthossz-alapú) adatvizsgálat lehetőségének megteremtésével pontosabb információ vált elérhetővé a brammákat ért hatások azonosítása érdekében. Az adatfeldolgozó rendszer további nagy előnye, hogy a feltárt tipikus adathibák ismeretében, valamint az öntési szakaszok azonosítási elvének felhasználásával további folyamatos öntőművekre is tetszőlegesen adaptálható.

Szem-mozgás- és kézmozgáskövetés alkalmazása egyes feladatok végrehajtásának elemzésére, az oktatás hatékonyságának növelésére (Ujbányi Tibor)

Az információfeldolgozás mikéntje egyre nagyobb hangsúlyt kap a műszaki oktatásban. A hallgatóknak egyre növekvő információhalmazból kell kiválasztani, szűrni és hasznosítani a számukra megfelelőt, majd ebből abból információhalmazt előállítani, továbbgondolkodni és folyamatosan építeni a megoldás felé vezető úton.

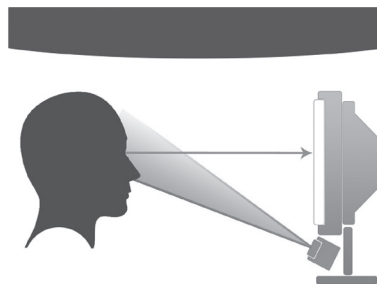
[15] Ujbányi, T.–Katona, J.–Kővári, A. (2018): Analysis of fixations while solving a test question related to computer networks. *Teaching Mathematics and Computer Science*. 16. (1.) Pp. 111–129.

[16] Ujbányi, T.–Stankov, G.–Nagy, B. (2019): *Eye tracking based usability evaluation of the MaxWhere virtual space in a search task*. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Pp. 469–474.

[17] Ujbányi T. et al. (2019): Pilot Application of Eye-Tracking to Analyze a Computer Exam Test. In: *Cognitive Infocommunications, Theory and Applications*. Pp. 329–347.

Az algoritmikus gondolkodás képessége, az analitikus gondolkodásmód fejlesztése, a rendszerben történő gondolkodás elősegítése középpontba kerül. Az információ kiválasztása, szintetizálása, hasznosítása, az információkkal való kollaboráció, a kreativitás, a problémamegoldó gondolkodás fejlesztése kulcskérdés. A felsőoktatásban – azok interoperabilitása okán – előszeretettel használnak LMS- (Learning Management System) rendszereket (pl. Moodle), megadva ezzel minden szükséges támogatást az e-Learning hatékonyabbá tételéhez. Manapság egyre több kutatás foglalkozik az ún. 3D-s virtuális terek oktatásban történő használatával, ami hosszú távon eredményesen járulhat hozzá az újkori igényeknek megfelelő oktatási módszertanok hatékonyságának növeléséhez. Az elvégzett kutatások a szemmozgáskövetés adta lehetőségeket kihasználva elsősorban egyes feladatok végrehajtásának megfigyelésére irányultak, például a hálózati topológia és a paraméterek megfigyelése [15] vagy a keresési feladat elemzése terén [16]. A szemmozgás megfigyelésének elrendezését mutatja a 6. ábra. A szemmozgáskövető eszköz a tesztalany szemének mozgását tudja rögzíteni, miközben egy monitor képernyőjét figyeli [17].

6. ábra. A szemmozgáskövetés módszere



A vizsgálatok kiterjedtek a szem–kéz-koordináció elemzésére is, amely alatt azt a képességet vagy tevékenységet értjük, amelyhez a kezünk és a szemünk egyidejű használata szükséges oly módon, hogy a szemünk által érzékelt információt (vizuális-térbeli észlelést) használjuk fel a kezünk irányításához. A szem–kéz-koordináció számos mindennapi tevékenységünk alapfeltétele, beleértve az írást és az olvasást. A szem–kéz-koordináció kinematikájában, mielőtt a kezek mozgásba lendülnek, a szemek először fixálják a céltárgyat, így biztosítva az agynak a szükséges térbeli

információkat. Egyes esetekben a tekintet az adott tárgyra fókuszál, s ameddig a kéz meg nem fogja vagy mozgatja a tárgyat, addig a szem végigköveti azt, mielőtt a kezünk cselekedne. A szem a vizuális információ továbbítására, a kéz pedig – a szemtől kapott vizuális információ alapján – egy adott feladat elvégzésére szolgál. A szem–kéz-koordinációnak fontos szerepe van olyan aktív tevékenységek (pl. sport) végzésekor is, amelyek motorikus koordinációt igényelnek. A tématerületet érintő korábbi kutatások jól mutatják a szemmozgás és a finom motoros mozgás közötti összefüggéseket, az ember-számítógép-interfészek fejlesztésében a szem–kéz-koordináció fontos szerepet játszik. Az elvégzett kutatások ennek egy részterületére irányulnak. A kutatásokban bemutatott vizsgálatok célja összefüggéseket feltárni a hagyományos, ill. a kézigesztus-vezérléssel történő feladatmegoldás kapcsán, a szemmozgáskövetéssel összefüggésben. [18], [19] A szem- és kézmozgás megfigyelésére alkalmazott tesztkörnyezet látható a 7. ábrán, melyen a kézmozgás Leap Motion-eszközzel, a szemmozgás pedig Eye-Tribe Tracker-rel került érzékelésre.

7. ábra. Kézmozgás-elemzéshez használt tesztkörnyezet



[18] Ujbányi, T. (2018): *Examination of eye-hand coordination using computer mouse and hand tracking cursor control*. In 2018 9th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom). Pp. 353–354.

[19] Ujbányi T. et al. (2020): *Examination of the eye-hand coordination related to computer mouse movement*. *Infocommunications Journal*. 12. (1.) Pp. 26–31.

[20] Lampert, B.–Pongrácz A.–Sipos J.–Vehrer A.–Horváth, I. (2018): „Max-Where VR-learning improves effectiveness over classical tools of e-learning”. *Acta Polytechnica Hungarica*. 15. (3.) Pp. 125-147.

VR, digitális és e-Learning-környezetek az oktatás támogatásában (Nagy Bálint)

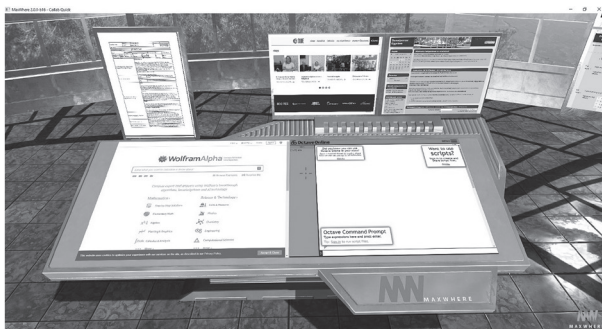
Számos kutatás mutatja, hogy a tananyagok a hagyományos nyomtatott változatnál hatékonyabb formában mutathatók be a virtuális tanulási környezetek és virtuális valóság (VR) alkalmazásával [20]. Az elvégzett kutatások ezen terület vizsgálatára irányultak.

A VR ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE A MATEMATIKA OKTATÁSÁBAN

A *Matematika* 3. tananyag fejlesztése során így figyelmünket a VR által kínált lehetőségek felé fordítottuk. A Moodle tökéletesen ellátja a hallgatók azonosítását és a felhasználókhoz rendeli a tanuláshoz szükséges megfelelő jogokat, így a Moodle-keretrendszerben már felépített tananyagra támaszkodtunk. A *Matematika* 3. tantárgy leírása szerint a félév 13 tanulmányi hete során a hallgatók két zárthelyi dolgozatot írnak. Minden dolgozat tananyaga külön VR MaxWhere térben érhető el, így a tantárgy teljes tananyaga két – célszerűen hasonló felépítésű – térben található meg. A térben a 8. ábrán látható központi asztal és – a tananyagrésznek megfelelően – számos további asztal helyezkedik el. A központi asztalon öt, a tanulás szervezéséhez szükséges tartalom érhető el: az egyetemi weboldal, az egyetemi elektronikus oktatási keretrendszer, a Moodle bejelentkezési oldala, a tantárgy leírása, továbbá két, a gyakorláshoz használható matematikai program – a Wolfram Alpha és az Online Octave – weboldala érhető el. Az egyetemi weboldalról minden, az egyetemi élettel kapcsolatos információ közvetlenül elérhető, így nélkülözhetetlen kiindulópontja a tanulásnak. Innen lehet bejelentkezni az egyetem Neptun-rendszerébe, ahol a hallgatók a tanulmányi ügyekkel kapcsolatos adminisztrációt tudják intézni. Az asztalon szintén megtalálható tantárgyleírás tartalmazza a tantárgy címét, a felelős oktató nevét, a tanulmányi eredményekben kifejezett követelményeket. Itt található a tantárgy fejezeteinek rövid bemutatása is. A kötelező és ajánlott irodalom felsorolása, a zárthelyik leírása, időbeosztása és – természetesen – a tantárgy elsajátításához javasolt ütemezés mind a nappali, mind a levelezős hallgatók számára itt érhető el. Szintén a központi asztalon érhető el a Moodle bejelentkezési oldala, amin keresztül a hallgatóknak be kell jelentkezni a további munkához. Ezután a rendszerben megtörténik a hallgató azonosítása és a megfelelő Moodle-tartalmak és jogok hozzárendelése, így a

hallgató kezdheti a munkát [21]. A tanuláshoz a megfelelő tananyagrészt azonosítása szükséges, melyhez a rendelkezésre álló tantárgytematika ad segítséget.

8. ábra. Központi asztal a MaxWhere virtuális térben



A további asztalokon mindegyik zárthelyihez tartozó tér esetén, hasonló szerkezetben, a szükséges tananyagok érhetőek el, az alábbiak szerint:

- videó;
- az előadás prezentációja;
- a példatár kapcsolódó része megoldásokkal;
- megoldható Moodle-teszt;
- online octave.

A hallgatókkal folytatott személyes beszélgetések felhívták a figyelmünket arra, hogy sokak számára technikai korlátai vannak a tananyagok virtuális térben történő alkalmazásának. Azon hallgatók azonban, akik számára nincs ilyen informatikai korlát, üdvözlötték az új lehetőséget [22].

DISZRUPTÍV TECHNOLÓGIÁK ÉS A KÖZÉPISKOLÁS KOROSZTÁLY

Ebben a felmérésben 116 középiskolás diákot kérdeztünk Dunaújváros két gimnáziumában, 2019 júniusában. Kutatásunk során a technológia oldaláról közelítettük meg az oktatás hatékonyságának és sikerének kérdését. Az alapstatisztikákon kívül

[21] Bognár, L.–Fáncsikné Hamar, É.–Horváth, P.–Joós, A.–Nagy, B.–Strauber, G. (2018): Improved learning environment for calculus courses. *Journal of Applied Technical and Educational Sciences*. 8. (4.) Pp. 35–43.

[22] Nagy B. (2018): VR alkalmazásának lehetősége a matematika oktatásában. In: XXI. Apáczai-napok konferencia. „Útkeresés és újratervezés”. Tanulmánykötet. Pp. 305–309.

[23] Cserné, P. M.–Kocsó, E.–Nagy, B.–Fauszt, T. (2020): Interaction of students and the digital educational environment on the University of Dunaujváros. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 411–415.

[24] Nagy, B.–Váraljai, M.–Mihalovicsné, K. A. (2020): E-learning Spaces to Empower Students Collaborative Work Serving Individual Goals. *Acta Polytechnica Hungarica*. 17. (2.) Pp. 97–114.

[25] Váraljai, M.–Nagy, B. (2019): A Survey in Issues of Disruptive Technologies to Broaden Learning for The Future Students. In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*. Pp. 391–396.

három fő területre összpontosítottunk: az IKT-ellátásra, a virtualitásra és a diszruptív technológiákra, melyek támogatják az egyén eszközhasználati szokásait és tapasztalatait [23], [24], [25].

1. megállapítás: A jövő hallgatói generációjánál az internet, az okostelefon és a laptop már beágyazódott a tanulási folyamatba.

2. megállapítás: A hallgatók tanulási szokásai teljesen eltérnek az előző hallgatói generációtól. A technológia használatának eredményeként a multitasking és a kollektív tudásmegosztás és generalás erőteljesen befolyásolja esetükben az együttműködés szükségességét, és a közösség összetartó ereje elősegíti fejlődésüket.

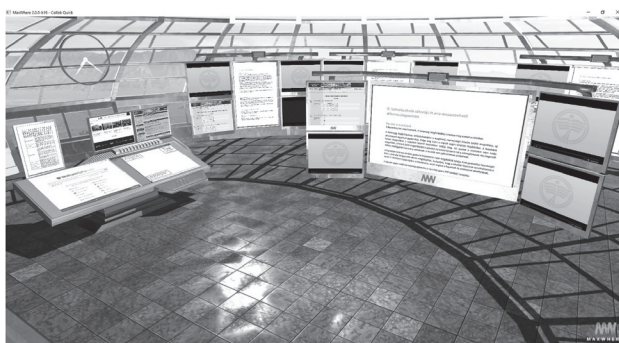
3. megállapítás: Mivel a képernyő előtt nőttek fel, nem idegenként viszonyulnak a 3D-s világhoz, szeretik a virtuális játékokat. Élményforrásaik számos érzékre hatnak, ezért érdemes hasonló elemeket is beépíteni a tanulási folyamatba.

4. megállapítás: Függetlenül attól, hogy milyen erős a szimbiózis a technológiával, és mennyire nézik a jövőbeni legújabb fejleményeket, fontos szem előtt tartani az emberi tényezőket. A tanuló/hallgató van a tanítási-tanulási folyamat középpontjában, és a technológia az ő szolgálatában áll, hogy sikeres legyen a tanulási folyamat. A technológia és a jólét kapcsolata döntő fontosságú az oktatásban. A jövő generációja számára az együttműködés erős igény: az emberi kapcsolatok hiánya hátrányosan befolyásolja a tanulási folyamatot. A virtuális valóság fejlődése képes egyre kifinomultabb kifejezőerővel ellátni a virtuális teret, pontosabbá tenni a valóságot, s ezáltal képes a lehető legpontosabban közvetíteni és kifejezni az emberi érzelmeket. A reális ábrázolás és az infokommunikáció kombinációja biztosíthatja az emberi kapcsolatok hatékony működését.

5. megállapítás: A fenti megfigyelésekből arra is lehet következtetni, hogy a tanulás megszervezésében az emberi tényezők figyelembevétele az elsődleges szempont. A generációs jellemzőket általában ismerjük, de az oktatási folyamat középpontjában az egyén áll, az egyéni igényeket kell kiszolgálni. A cél az

egyének tanulmányi előrehaladásának elősegítése. A középfokú oktatás mint tömeg-oktatás, nem mindig képes alkalmazkodni az egyén igényeihez – sem eszközellátásban, sem módszertanban. Azok számára, akik nincsenek megelégedve a jelenlegi oktatással, alternatív út áll rendelkezésre az egyéni fejlődés támogatására, különféle diszruptív technológiák, például az elektronikus tanulási környezet (Moodle), a tömeges online tanfolyamok (MOOC, K-MOOC) és a virtuális 3D-terek segítségével (9. ábra).

9. ábra. Matematika-tananyagok a CollabQuick VR 3D térben



Navigációs módszerek elemzése MaxWhere virtuális térben

(Berki Borbála és Sudár Anna)

Kutatási cél a MaxWhere 3D környezet jelenlétérzés profiljának elkészítése, valamint navigációs módszerének részletes bemutatása, szakirodalmi keretbe ágyazása. Ennek megfelelően elkészült a MaxWhere virtuális valóság asztali verziójának jelenlétérzés-profilja. A felmérés során IPQ-kérdőív [26] került felhasználásra, 31 fő bevonásával.

Az eredmények alapján a MaxWhere virtuális valóságban tapasztalt jelenlétérzés szintje megfelel a más hasonló asztali virtuális valóságokban tapasztalhatóhoz. A kérdőív által mért faktorok közül az általános és a téri jelenlét érzése relatíve magas volt, míg a legalacsonyabb az észlelt realizmus volt [27].

[26] Schubert T.–Friedmann F.–Regenbrecht H. (2001): The experience of presence: Factor analytic insights, Presence: Teleoperators & Virtual Environments, vol. 10. (3.) Pp. 266–281.

[27] Berki, B. (2020a): Level of Presence in MaxWhere Virtual Reality. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom). Pp. 487–491.

[28] Baranyi, P.–Galambos, P.–Csapó, A.–Jaloveczki, L. (2018): Cognitive navigation and manipulation (CogiNav) method, Patent US 2018/0 032 128A1. *US Patent App.* 15/658,579.

[29] Berki, B. (2020b): Navigation Power of MaxWhere: a Unique Solution. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 511–515.

[30] Sudár, A.–Berki, B. (2020): *Proposing a complex cognitive desktop virtual reality test*. In: *The 1st Conference on Information Technology and Data Science: Book of abstract*. Pp. 159–160.

A MaxWhere navigációs technológiájának felmérése alapján elmondható, hogy az egyedi CogiNav [28] technológia a bevett mozgásoperációkon túl a mérnöki szoftverekből ismert orbit funkciót is lehetővé teszi. Az ismert navigációs eszközök használata, mint az egér és az érintőpad, növeli az észlelt természetességet, a navigációs operációk analóg jellemzői pedig lehetővé teszik a könnyű elsajátítást [29].

A másik kutatási cél egy komplex virtuálmérőter megtervezése volt a humán végrehajtó funkciók komplex mérésére a MaxWhere platformon. Ebben a mérésben az alanyok egy virtuális város különböző pontjain hajtanak végre különböző feladatokat (kategorizáció, Stroop-feladat, virtuális, mentális forgatási teszt), s így egy virtuális térben mindhárom funkciót (váltás, gátlás, munkamemória) mérni tudjuk komplexen és kontrollált módon [30].

Összefoglalás

Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része került összefoglalásra, elsősorban az ember–számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek, továbbá virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások tekintetében. A jövőbeli kutatási irányok meghatározása ezen eredmények értékelésén alapul.

Köszönetnyilvánítás

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.

Kézi gesztusvezérlés-alapú ember-számítógép-interfész

Összefoglalás: A piacon több játék, telefon, tablet is kapható, melyek kézi gesztusvezérléssel is korlátozott gesztusjel-mennyiséggel és korlátozott gesztustérben. A legtöbb ember ma még úgy gondolja, hogy ezek inkább csak játékrávalók. Az ipari alkalmazási területe valóban még elég kicsi. Azonban több olyan területen is, ahol a pontos érintés vagy a hangvezérlés nehezen használható, alkalmazható lenne a gesztusvezérléses irányítás. A számítógépek gesztusvezérlését a hagyományos webkamerákkal, a kifejezetten ilyen célra fejlesztett eszközökkel lehet megoldani. Az utóbbi időben egyre több olyan eszköz jelenik meg elérhető áron, melyekkel ún. mélységi felvételeket is lehet készíteni. Ezek az eszközök jól alkalmazhatóak a kutatásban. Több olyan ingyenes szoftver is megjelent az elmúlt egy évben, mely a kéz jeleit értelmezi, legtöbbször alakfelismerő szoftverek segítségével. A COVID-19 megjelenése előtérbe helyezte ezeknek a kutatásoknak a felgyorsítását, hiszen az érintés nélküli vezérlés az egyik legjobb módja a vírusterjedés megelőzésének. A gesztusvezérlést egyre több gyártó építi be pl. az autók számítógépeinek vezérlésébe vagy a nagy szennyezettségű, ill. steril helyen történő vezérlésekhez. **Kulcsszavak:** Gesztusvezérléses irányítás; webkamera; mélységi felvételek; alakfelismerő szoftverek.

Abstract: There are several games, phones, and tablets available on the market, which can also be used with manual gesture control, of course with a limited amount of gesture signals and limited gesture space. Most people today still think they are more of a game. The area of industrial application is still quite small. However, in several places where precise touch or voice control is difficult to use, gesture control could be applied. Gesture control of computers can be solved with traditional web cameras, with tools specially developed for this purpose. Recently, more and more devices are appearing at affordable prices

* Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: kiru@uniduna.hu

with which the so-called. depth shots can also be taken. These tools are well suited for research. Several free software programs have been released in the last year that interprets hand signals most often using shape recognition software. The advent of COVID-19 has highlighted the acceleration of this research, as non-contact control is one of the best ways to prevent the spread of the virus. Gesture control is being installed by more and more manufacturers, for example, in the control of cars' computers, or the control of highly polluted or for controls in a sterile location.

Keywords: Gesture control of computers; webcam; depth shots; shape recognition software.

Bevezetés

A Dunaújvárosi Egyetem 2017-ben alapított kutatócsoportja a gesztusokkal – elsősorban a kéz és ujjak jeleivel – vezérelt számítógépek lehetőségeit kutatja. A piacon több játék, telefon, tablet is kapható, melyek kézi gesztusvezérléssel is használhatóak, természetesen korlátozott gesztustérben, korlátozott gesztusjelmennyiséggel. A legtöbb ember ma még úgy gondolja, hogy ezek inkább csak játékra valók. Az ipari alkalmazási területe valóban még elég kicsi. A gesztusvezérléses irányítás azonban több olyan helyen is alkalmazható lenne, ahol a pontos érintés vagy a hangvezérlés nehezen használható. A számítógépek gesztusvezérlését a hagyományos webkamerákkal, a kifejezetten ilyen célra fejlesztett eszközökkel lehet megoldani. Az utóbbi időben egyre több olyan eszköz jelenik meg elérhető áron, melyekkel ún. mélységi felvételeket is lehet készíteni. Ezek az eszközök a kutatásban jól alkalmazhatóak. Az elmúlt egy évben több olyan ingyenes szoftver is megjelent, mely a kéz jeleit értelmezi, legtöbbször alakfelismerő szoftverek segítségével. A COVID-19 megjelenése előtérbe helyezte ezeknek a kutatásoknak a felgyorsítását, hiszen az érintés nélküli vezérlés az egyik legjobb módja a vírusterjedés megelőzésének. A gesztusvezérlést egyre több gyártó építi be pl. az autók számítógépeinek vezérlésébe, vagy a nagy szennyezettségű, ill. steril helyen történő vezérlésekhez.

Gesztusvezérlési lehetőségek

Az utóbbi időben a kézi gesztusvezérlés egyre inkább elterjedt a játékok és a mindennapi eszközeink terén. Ezek az eszközök a gesztusok felismerésének legkülönbözőbb módszereit használják. A játékoknál leginkább a mozgásérzékelés, míg a komputervezérlésnél a képi feldolgozás ad lehetőséget a gesztusok értelmezésére. Már otthoni eszközvezérlés is elérhető olcsó eszközökkel (Leap motion, Fibaro), illetve saját magunk is készíthetünk programokat a google osztálykönyvtárai segítségével. Arduino-alaplapok és -ér-

zévelők stb. használatával komplett eszközöket is készíthetünk. Nagyon sokan még ma is csak játékként érdekességgént tekintenek a gesztusvezérlésre (az Intel vezére, Brian Krzanichar már 2015-ben robotpókokat ugráltatott kézjelekkel).

A gesztusvezérlés számtalan lehetőséget nyújt az okos otthonok vezérlésében (elektromos berendezések be- és kikapcsolása, hangszórók hangerősségének beállítása, az idővel és kézjelekkel összekötve pl. egy kávé elkészítése mellett kézjelekkel kérhetünk egy biztonsági lezárást vagy akár egy telefonszám (pl. rendőrség, vészhívó) hívását.

A gesztusvezérlésnek a jövőben biztosan nagy jelentősége lesz a kollaboratív robotok irányításában, ill. biztonságtechnikájának kialakításában. A robot, észlelve például a mellette dolgozó humán munkaerő mozdulatait, csak akkor kezdi meg a tevékenységét, ha a humán munkás már befejezte a munkáját (letette az alkatrészt). (A gesztusvezérelt robotokon a SZTAKI munkatársai is dolgoznak.)

A gesztusvezérlés kutatása

Jelenleg több ipari cég és egyetem is foglalkozik a gesztusvezérlés kutatásával (csak néhány példa a világból):

Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar: képfeldolgozás. A kutatólaboratórium kutatása: eljárás kézjelek felismerésére és a számítógép kamerán keresztüli vezérlésére, egyénre szabott, szemmozgás által vezérelt felhasználói felület. A temesvári egyetem kutatócsoportja: Ujjbegyalapú valós idejű követés és gesztusfelismerés a természetes felhasználói interfészek számára. St. Joseph Engineering College, Mangaluru, India: Hand Gesture Recognition using Webcam.

Játékok

A ma gesztusvezérlésként bemutatott játékok inkább a kézre szerelt, az elmozdulást érzékelő (leggyesze-
rűbb induktív elfordulás- és elmozdulásérzékelőkkel ellátott játékok), botkormányos távvezérlőket vagy a playstation-okat váltják ki. Ezek az eszközök nem is nevezhetők igazán gesztusvezérelt berendezéseknek, hiszen nem a gesztusok, hanem az elmozdulás, elfordulás alapján adnak le jeleket.

[1] <https://www.banggood.com/>

[2] <https://www.amazon.de/>

[3] <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

[4] <https://www.banggood.com/Educational-DIY-Smart-Robot-Car-Kit-Gesture-Control-Car-Hand-Gesture-Car-For-Arduino-p-1732917.html>

1. ábra. Mozgásérzékelő ujj- és karperecek által vezérelt játékok [1], [2], [3]



Eszközbe integrált gesztusfelismerő rendszerek

A Leap Motion egy elég rég a piacon lévő fejlesztés, mely egy olyan kis eszközt tartalmaz, melyet a billentyűzet elé téve és afelett mozgatva adhatjuk meg a gesztusjeleinket. Az eszköz könnyen programozható és elég látványos vezérléseket adhatunk meg vele. A gesztus eszközkészlete nem korlátozott, a szoftvernek további utasításokat is „megtaníthatunk”, s ez a tulajdonsága a Leap Motion-t kétségtelenül a hasonló funkcióban kapható eszközök elé helyezi.

2. ábra. Leap Motion [4]



3. ábra. Fibaro swipe és a Bearbot [5] [6]



[5] <https://www.fibaro.com/hu/>

[6] <https://www.indiegogo.com/projects/bearbot#/>

[7] <https://www.banggood.com/>

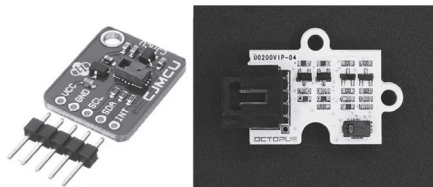
A Bearbot egy barnamedve, mely a távirányítókkal összehangolva, kézjelek alapján vezérli az otthoni készülékeket.

Fibaro swipe kézmozdulatokkal irányítható vezérlő pad okos otthonokhoz

Gesztusfelismerő szenzorok

A piacon egyre több beszerelhető, korlátozott gesztusfelismerésre alkalmas szenzor jelent meg, melyeket hobbi- és ipari alkalmazásokban egyaránt lehet alkalmazni. Az ilyen berendezéseket szintén játékokban használják leginkább. Az Arduino-termékcsaládba integrálható néhány szenzor:

4. ábra. Gesztusfelismerő szenzorok



CJMCU-7620 Gesture Recognition Sensor, Octopus Gesture Sensor PAJ7620U2 [7]

CJMCU gesztusérzékelő szenzor:

9 féle gesztust tud azonosítani, beleértve a felfelé, lefelé, balra, jobbra, előre és hátra; az óramutató járásával megegyező kerületi; az óramutató járásával megegyező lefelé, lefelé, balról jobbra, balról jobbra haladást.

Octopus gesztus szenzor:

Az Octopus Gesture Sensor PAJ7620U2, amely egyetlen chipbe integrálja a gesztusfelismerő funkciót az általános I2C interfésszel. 9 kézmozdulatot képes felismerni, többek között felfelé, lefelé, balra, jobbra stb. Csak egyszerű mozdulatok megkülönböztetésére használható.

Ezek az eszközök a termékcsaládban megtalálható építőcsomagokban is megtalálhatóak, ill. használhatóak (pl. okosautó, robot-mobiltelefon építéséhez, ill. funkcióbővítéséhez).

Telefonokba és mobil eszközökbe épített gesztusvezérlési lehetőségek

A telefongyárók már régóta versenyeznek a felhasználókért, ezért több kamera már mélységérzékelővel is ki van egészítve, ill. az előlapi részen külön mélységérzékelő, ill. egyes telefonoknál egyszerűbb gesztus szenzor is megtalálható.

MOBIL ESZKÖZÖK GESZTUSVEZÉRLÉSE

Androidos telefonok:

A mobileszközökre (telefon, tablet) nagyon hamar megjelentek az érintés lehetőségei; számos készülék szoftverei (Samsung Galaxy S4, Huawei Mate Pro, LG G8 ThinQ) már használják ezeket. Az érintés nélküli mód számos esetben hasznos lehet, ha pl. maszatos kézzel nem akarunk a telefonunkhoz érni, vagy pl. a strandon szeretnénk vizes vagy homokos kézzel felvenni egy hívást). A vezérléshez külön kamerákat építettek be, de arra is van lehetőség, hogy a telefon előlapi kamerájával és szoftveres megoldással vezéreljük készülékünket.

Android:

A letölthető programok a telefonunk, tabletünk előlapi kameráját használva érzékel néhány, a kezünk által leírt alapmozdulatot: legyezéssel lapozhatunk a médiatartalmak között; leállíthatjuk a zene- ill. videolejátszást; a Motion Sense, Wave Control, Proximity Actions szoftverekkel hívásfogadást, -megsza-

kítást vezérelhettünk; integetéssel ki-és bekapcsolhatjuk a kijelzőt (Wave Up, KinScreen). Természetesen ezek a szoftverek sem tudnak működni anélkül, hogy az előlapi kameránkba be ne lenne építve egy távolságérzékelő. Ezek a szoftverek általában a képi alakot és a távolságot mérik, ezért lehet integetéssel vagy – ahogy angolul hangzik – hullámmal (a kéz hullámozó mozdulataival) üzemeltetni őket. Természetesen a kézi gesztusjelek mellett nagyon népszerűek a hanggal vezérelt szoftverek és a hangvezérlés operációs rendszerre ültetése is (ezzel ebben a cikkben nem foglalkozunk).

IOS:

Az Apple eszközökre sokkal kevesebb lehetőséget találtam a gesztusvezérléshez, az érintés nélküli vezérléseket leginkább hangvezérléssel helyettesítené. Bár van letölthető gesztusvezérelt app (pl. Wave Control for iOS), a változatosság közel sem akkora, mint az android eszközök esetében.

PC-k, laptopok gesztusvezérlési lehetőségei (letölthető gesztusvezérelt eszközök)

Többnapos használatban lévő laptop esetében a gyártók már gondoskodtak a gesztusvezérlés lehetőségeiről. A Lenovo pl. saját szoftvert is kínál, a Lenovo Motion Control szoftvert, mely intelligens, intuitív módja a webkamerával való interakciónak. A Lenovo a különféle laptop- és számítógépes eszközei használatához az IntelR RealSense™-szoftvert kínálja.

Az ipar egyik legfejlettebb mozgás- és gesztusvezérlő platformjaiként ismert RealSense™ nemcsak a kéz-, hanem a fejmozdulatokat és az arckifejezéseket is képes felismerni. A RealSense™-technológiát a DELL, az Acer, az HP és a Samsung is alkalmazza több laptopban, ill. kijelzőben, és valószínűleg egyre inkább elterjedt technológia lesz a közeljövőben. A cikk későbbi részében még a kutatáshoz kapcsolódóan foglalkozunk a RealSense-megoldásokkal.

A RealSense-technológia azonban a legtöbb laptopban, monitorban ma még nem található meg, ezért ezeknél az eszközöknél a minden laptopban rendelkezésre álló webkamera használatával tudunk gesztusjeleket értelmezni. Talán a webkamerára kidolgozott gesztus felismerésnek van a legnagyobb publikációja a világban. Az ujjak, ujjbegyek, testmozdulatok, fejmozdulatok, szemkövetés, az egér teljes kiváltását, de még a néma beszéd gesztusjeleinek felismerését is több egyetemen, kutatócsoportban és szoftverfejlesztő cégeknél is kutatják.

Az interneten számos olyan alkalmazás, ill. szoftverkönyvtár érhető el, amely lehetővé teszi a gesztusvezérlések beépítését saját fejlesztésű szoftvereinkbe:

TensorFlow

A Deep Learning, a Machine Learning (röviden: ML) egyik ága, ami olyan algoritmusokkal foglalkozik, melyeket az emberi agy működése inspirált. Ezeket Artificial Neural Network-nek (a magyar szakirodalomban: mesterséges neurális hálózatnak, mesterséges neuronhálónak) nevezik. Az emberekhez hasonlóan, a neuronháló is tapasztalás vagy példák által tanítható.

A Google által fejlesztett TensorFlow egy ingyenes, nyílt forráskódú, neurális operációkat tartalmazó könyvtár, mellyel ML-modelleket tudunk fejleszteni.

OpenCV

Az Open Computer Vision Library, a legszélesebb körben használt képfeldolgozási és ML-osztálykönyvtár. Elsősorban azért hozták létre, hogy közös infrastruktúrát biztosítson a számítógépeslátás-alkalmazások számára, és felgyorsítsa a gépi észlelés használatát.

Handtrack.js

A Handtrack.js egy weboldalon futtatható, kézfelismerést biztosító javascript könyvtár. Tensorflow API-t használ, viszonylag gyorsan és megbízhatóan működik, azonban az ujjakat külön nem tudja felismerni, ezért nekünk nem megfelelő.

Mediapipe

A Mediapipe a Google által fejlesztett, ingyenes, nyílt forráskódú keretrendszer, amivel több platformra (mobil, web, iOS, Linux) tudunk gépi érzékeléssel (OpenCV és TensorFlow modell) ellátott szoftvert készíteni.

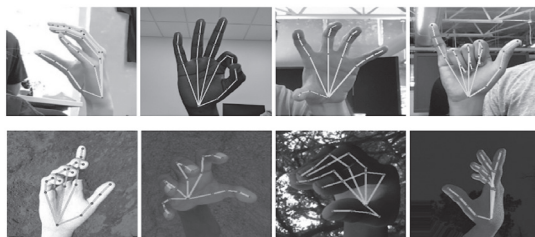
A keretrendszer az új modellekkel folyamatosan bővül, ebből néhány kész megoldást biztosít nekünk:

- Arcfelismerés
- Kézfelismerés
- Haj-szegmentálás
- Írisz-felismerés
- Pozitúra-felismerés
- Mozgás-felismerés
- Objektum-felismerés
- Objektum-felismerés 3D-s térben
- KNIFT (Keypoint Neural Invariant Feature Transform)

A kézfelismerés az ujjakat és azok pontjainak pozícióját is pontosan meghatározza, így a különböző gesztusok, kézjelek felismerhetőek. A Mediapipe jelenleg Android-, Linux- és IOS-rendszerek támogató-

sával működik stabilan. Lehetőség van csak CPU-, illetve GPU-támogatással készíteni szoftvert. Utóbbihoz legalább OpenGL ES 3.1 szükséges, aminek köszönhetően Raspberry Pi 4-en is futtatható grafikus kártyával a programunk.

5. ábra. A Google Mediapipe kézfelismerési lehetőségei [8]



A Mediapipe működése

A Mediapipe már a nevében is feltűnteti (pipeline) amolyan csővezetékszerű működését. Ez nagyjából stimmel is, hiszen a vezeték egyik végén beküldünk egy bizonyos adatot, például egy képet, és a másik végén visszakapjuk azt filterezve. A gyakorlatban azonban ez kicsit bonyolultabb.

Gráf

A Mediapipe egy gráfós szerkezetet valósít meg, melyhez egy vagy több forrást (input stream) tudunk csatlakoztatni – például videót, kameraképet vagy mikrofont –, és ezeken tudunk számításokat végezni vagy manipulálni, majd kiadni egy vagy több csatornán (output stream), és használni azt. A gráfok csúcsai bizonyos állomásokat jelölnek, ahol az adatmanipulációk vagy számítások történnek. Ezek lehetnek kalkulátorok (calculator node) vagy algráfok (subgraph). Az állomások között meghatározott sorrendben történik a kommunikáció – amiről külön ütemezési rendszer gondoskodik –, saját Mediapipe csomagok (Package) által. A gráf élei jelölik ezen csomagok útvonalát.

A könnyebb átláthatóság miatt a Mediapipe csapata készített egy gráf vizualizációs szoftvert (Visualizer), ami beolvassa a .pbtxt kiterjesztésű gráf-fájlt, majd értelmezi és szemlélteti azt. A Visualizer a <https://viz.mediapipe.dev/> oldalon érhető el.

[8] <https://www.slashgear.com/google-mediapipe-hand-tracking-bodeswell-for-ar-and-smart-glasses-26588596/>

Az algráfok valójában kalkulátorok egy kisebb, összefüggő csoportja, melynek segítségével a MediaPipe könnyebben modularizálhatóvá válik. Algráf meghatározásához külön gráf-fájlt kell létrehozni.

Kalkulátorok

Kalkulátor alatt egyszerűen egy kódsort vagy osztályt értünk, ami CalculatorBase osztályból van származtatva. A CalculatorBase írja le azt a 4 db szükséges függvényt, amit minden kalkulátornak meg kell valósítania:

- GetContract()
- Open()
- Process()
- Close()

A GetContract()-függvény szolgál a bejövő és kimenő csomagok meghatározására. A gráf inicializálásánál hívódik meg, hogy ellenőrizze és igazolja a csomagok típusait. A csomagok meghatározására két lehetőségünk van:

- Címkézéssel (Explicitly tagged)
- Indexeléssel

A címkezés névvel, az indexelés számozással jelöli meg a kimenő csomagot. Indexelést összetettebb adatok megkülönböztetésére érdemes használni, minden másra elég a tagelés.

Az Open() a gráf indulásakor hívódik meg, egyszer; a kalkulátor-konfigurációt itt kell elvégezni. Ennél a pontnál már rendelkezésünkre áll az első bejövő csomag.

A Process()-en belül tudjuk meghatározni a kalkulátor feladatait. Minden új inputnál meghívódik. Ha hiba lépne fel, a keretrendszer a Close()-függvényt fogja meghívni.

A Close()-függvény az Open() befejezésével vagy hiba esetén hívódik. Ilyenkor már nincsenek kezelhető inputcsomagok, viszont küldhetünk outputot.

A CSOMAGOK SZINKRONIZÁLÁSA

A MediaPipe gráf végrehajtása decentralizált: nincs globális óra, és a különböző csomópontok egyszerre képesek feldolgozni a különböző időbélyegekből származó adatokat.

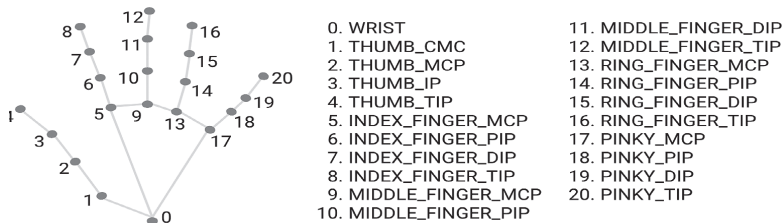
Node-oknak, melyek egyszerre több input streamet kezelnek, szükségük van valamiféle koordinációra. Például az objektumfelismerésnél ki kell jelölni a felismert objektumot, és kiírni a nevét, majd ezeket időben egyszerre megjeleníteni a videón. Ennek a szinkronizációs feladatnak okán hozták létre az idő-

bélyeg- (timestamp) alapú azonosítást, amiért teljes mértékig a keretrendszer felel. Ez annyit jelent, hogy a gráf minden input adathoz időbélyeget rendel, és az azonos időbélyeggel ellátott adatokat – például kép és hang – egyszerre dolgozza fel. Ha a feldolgozási idő különböző, akkor is megvárja az összes azonos időbélyeget, és egyszerre engedi ki az outputra.

Kéz felismerése

A MediaPipe egyik legnagyobb előnye, hogy a gépi felismeréshez optimalizáltabb Machine Learning-modellt alkalmaz. Vegyük példának a kézfelismerést. Az ujjak felismerése előtt azonosítja a tenyér pozícióját, majd ebből számol egy négyszöget, ami meghatározza a vizsgálni kívánt területet az ujjakhoz. A tenyér pozíciója megmarad a memóriában, ezért a következő képkocka esetében már nem kell újra lefuttatni a felismerést, ehhez az előző képkocka közelítő adatai is elegendőek. Legközelebb csak akkor kell újra futtatni, amikor a tenyér eltűnt a képről. Ha a kéz területe megvan, akkor az ujjakat is fel tudja ismerni. Az ujjperceket vektorként kezeli a modell.

6. ábra. Kéz-modell [9]



Gesztusok felismerése

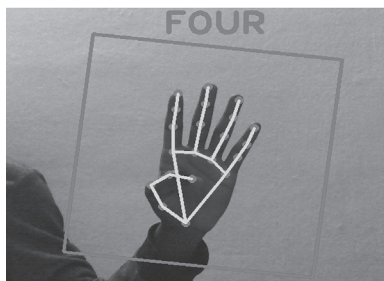
Az ujjpercek vektorait felhasználva meg lehet határozni bizonyos formákat, azaz statikus gesztusokat. Statikus gesztusokon kívül lehetőség van bonyolultabb, dinamikus gesztusok felismerésére is, ami használható például lapozásra vagy zoomolásra.

Saját esetünkben a statikus gesztusok elegendőek, hiszen csak számokat akarunk felismerni. A Hand Gesture Recognition kalkulátort használtam, ami már pár, előre megírt gesztust tud kezelni. Működésének lényege, hogy az ujjak nyitott vagy zárt állapotát tárolja változóban, majd ezekhez a különböző állapotokhoz rendel egy string-típust. Például, ha az összes ujj zárt, kivéve a mutató és középső ujjat, a hozzárendelt string értéke kettő lesz.

[9] <https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands#hand-landmark-model>

[10] forrás: <https://gist.github.com/TheJLifeX/74958cc59db477a91837244ff598ef4a>

7. ábra. Számfelismerés gesztusok alapján [10]



GUI

A Graphical User Interface-hez (röviden: GUI) több ötlet is felmerült. A GUI egyetlen követelménye, hogy több platformon is futtatható legyen, így a döntés a QT-ra esett. A grafikus felület először QT Creator-ben készült, majd a könnyebb integrálhatóság miatt áttértünk az OpenCV High-level GUI-ra, ami lényegében az OpenCV által használt QT-alapú GUI. Alapértelmezetten az OpenCV QT support nélkül installálódik, ezért újra kellett telepíteni WITH_QT flaget használva. Ezután már készíthetünk saját QT-ablakot a megjelenítéshez.

GUI Handler kalkulátor

A Hand Gesture Recognition kalkulátor alapvetően csak Annotation Overlay kalkulátornak küldi el a stringet változót, ami a gesztus nevét tárolja. Ennek a feladata az, hogy ráírja a videóra ezt a string-értéket. Nekünk viszont a pipe-folyamon kívül kell hozzáférni, ahol a GUI-t hozzuk létre és módosítjuk. A jelenlegi gráf egyetlen outputtal rendelkezik, amin a végleges videóképet küldi, ezért létre kellett hozni még egy output csatornát, ahol a gesztus-string érhető el.

A mi fejlesztésünkben sajnos nem sikerült közvetlen a Hand Gesture Recognition kalkulátorból az új outputra küldeni az adatokat, ezért saját kalkulátort kellett létrehozni – mint új állomást –, ami továbbítja a GUI kimenetre a stringeket. A saját kalkulátor feladata, hogy a bejövő inputot, minden változtatás nélkül továbbítsa a gráf második outputjára. A kalkulátor implementálásához minden olyan gráfot, algráfot módosítani kell, aminél jelen van a kalkulátor. Input–output–streameket és tag-eket jelölni kell a keretrendszer számára.

A kalkulátoron belül az előzőleg is leírt CalculatorBase függvényeket implementáltuk. Az GetContract()-en belül stream-típusok ellenőrzése és beállítása történt. A továbbítás a Process()-en belül történik.

A gráfot egy programon belül kell meghívni. A Mediapipe előre megírt egy gráf implementációt, amit fel tudunk használni. A gráfot a meghívás előtt konfigurálni kell egy CalculatorGraphConfig objektumban, majd egy OutputStreamPoller objektumot kell hozzákapcsolni, ahol a gráf által küldött outputot fogadjuk. Végül a gráfot a StartRun()-függvénnyel tudjuk futtatni.

A Google store-ban található Gravity Gestures a telefon fordításával, rázásával teszi lehetővé egyes alkalmazások indítását.

A Kézi gesztusvezérlés-alapú ember–számítógép-interfész kutatásfejlesztései

WEBKAMERÁVAL HASZNÁLHATÓ GESZTUSFELISMERŐ RENDSZER

A DUE kutatócsoportja által készített, az ujjakkal számokat mutató és azt felismerő alkalmazás a későbbiekben alkalmas lehet érintésnélküli sorszámhúzó automaták vezérlésére. A felhasználó több számot is mutathat egymás után, de az utolsó egy kézen mutatható szám után a felhasználónak az OK jel mutatásával le kell zárnia a szám bevitelét. Az input-számot aztán a számítógép egyéb szoftverei feldolgozhatják. További lehetőség egy számsor mutatása és lezárása, így egy kézzel többjegyű számokat is meg lehet adni a rendszernek. Az alkalmazás segítségével – pl. sorszámhúzó automatáknál – kiváltható az érintéssel vezérlés. A szoftver és a hozzá köthető erőforrás optimalizálása után akár egy kisebb teljesítményű beépített számítógépen is futtatható a rendszer.

8. ábra. DUE-projekt.

A kéz számjel mutatásának felismerése és a szám véglegesítése gesztus segítségével

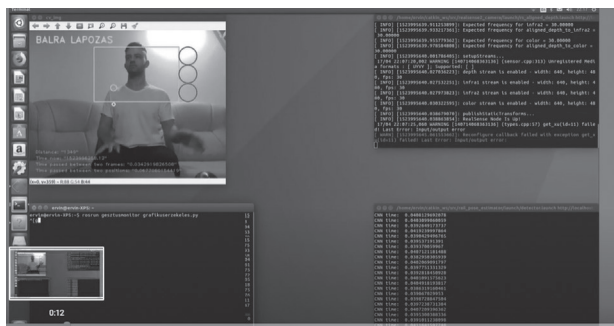


REALSENSE KAMERÁVAL HASZNÁLHATÓ SZÁMÍTÓGÉPES GESZTUSVEZÉRLÉS

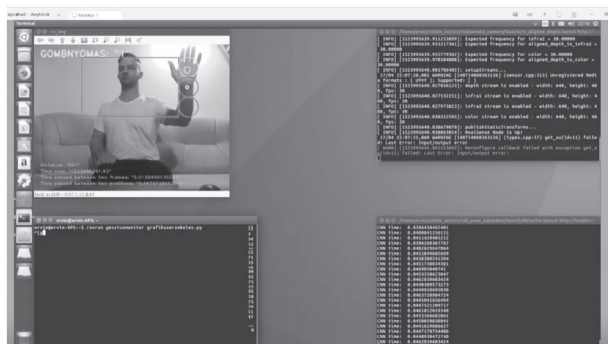
A RealSense kamerákkal használható gesztusfelismerő rendszerek esetében a gesztustér bővíthető. Mivel 3D-s kamerákat használunk, a felhasználó jól pozícionálható. (Kiküszöbölhetőek a több user észlelése általi vezérlési anomáliák: két ember keze van a képernyőn, akkor melyikük vezérel?) A 3D-s kamerák segítségével a gesztustér is sokkal jobban kiterjeszthető. Akár egy egész terem vagy szoba is szolgálhat gesztustérként, míg a webkamerás alkalmazásoknál főleg ez főleg a kamera (monitor) előtti területre korlátozódik. A RealSense kamerák a kineckelt eltűnését követően bukkantak fel az ipari alkalmazások mellett a személyi számítógépek világában. A ma már egyre olcsóbban beszerezhető eszközökkel számos ipari és otthoni alkalmazás készíthető. A kamera alkalmas a felületi eltérések észlelésére éppen úgy, ahogyan gesztusjelek azonosítására is.

A DUE kutatócsoportja a korábbi projektekben beszerzett RealSense kamerákhoz is készített olyan alkalmazást, mely a kéz jeleit használva egy honlapot vagy média lejátszót gesztusjelekkel vezérelni lehet. Az alkalmazásban egy nagyobb gesztusteret választottunk, ebben a felhasználó a teljes karjának elmozdításával lapozhat jobbra balra fel és le, valamint a képernyőre rajzolt gombokra kattinthat tenyere előrelépésével.

9. ábra. Lapozás a kéz mozgásával



10. ábra. Gombnyomás adott helyen



Összefoglalás

A gesztusvezérlés már nem csak egy kicsi célközönség játékaként jelenik meg napjainkban. A mobil-eszközökbe épített szenzorok lehetővé teszik, hogy drága berendezések megvásárlása nélkül is valós élmény átélésével tudjunk gesztusvezérelt számítógépeket használni. Ez a technológia a közösségi terekben elhelyezett érintőképernyős konzolok használatát is felválthatja, ami a COVID-19 kapcsán kialakult helyzetben különös jelentőséggel bír. Egyre több nyílt forráskódú rendszer teszi azt is lehetővé, hogy akár egy webkamera segítségével is kialakítsunk egy gesztusvezérelt környezetet saját fejlesztésű szoftvereink számára.

Köszönetnyilvánítás

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.



Gumikeverékek és különböző adalékanyagok hatása a természetes és mesterséges alapanyagokra

Összefoglalás: Szakirodalmi összefoglalónkban olyan cikkeket dolgoztunk fel, amelyek megmutatják, hogyan hatnak az alkalmazott adalékanyagok a természetes nyersgumi, illetve a vulkanizált gumi mechanikai tulajdonságaira. A kutatási projektekben használt korom, szilika, fémrészecskék, kalcium-karbonát, nanorészecskék, kitozán stb. jelentős mértékben képesek növelni a szilárdsági jellemzőket – mint a szakítószilárdság és a csavarási szilárdság –, s ezzel párhuzamosan csökkentik a szívóssági jellemzőt, a szakadási nyúlást. Azonban mindegyik publikáció beszámol arról, hogy van egy határérték, amely felett a különböző mikro es nano töltőanyagokat adagolva a mechanikai tulajdonságokban csökkenés/romlás tapasztalható. Ez az érték 50–80 phr között változik. A cikkekből megadott 100 phr értékű adalékanyagok szinte kivétel nélkül rosszabb mechanikai tulajdonságokat mutattak, mint a nyersgumi.

Kulcsszavak: Mesterséges gumi; korom, szilika; bio adalékok.

Abstract: In our review of the literature, we have developed articles that show how the applied additives affect the mechanical properties of natural raw rubber and vulcanized rubber. Carbon black, silica, metal particles, calcium carbonate, nanoparticles, chitosan, etc. as filling additives used in research project are able to significantly increase strength characteristics such as tensile strength and tear strength, and in parallel reduce the toughness characteristic tensile elongation. But each publication reports that there is a limit above which, when the various micro and nano fillers are added, there is already a decrease / deterioration in the mechanical properties. This value ranges from 50 to 80 phr. The additives with a value of 100 phr given in the articles showed almost without exception worse mechanical properties than the raw rubber.

Keywords: Artificial rubber; carbon black; silica; bio additives.

* Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet

E-mail: pazman@uniduna.hu

[1] *Inc. J. Appl. Polym. Sci.* 2019, 136, 47272.

Bevezető

Kutatómunkánk során szakirodalom-kutatást folytattunk annak érdekében, hogy minél részletesebb és szélesebb körű átfogó tudást szerezzünk a gumikeverékek és a hozzáadagolt különböző természetű anyagok hatásáról.

Szakirodalmi összefoglaló

1. cikk: *„Effects of the degree of crosslinking and test rate on the tensile properties of a crosslinked polyacrylic pressure-sensitive adhesive and vulcanized rubber; Yusuke Kashiwara Shun Okada Yoshiaki Urahama Shigeki Hikasa Satoshi Makuta Kazuko Fujiwara Syuji Fujii Yoshinobu Nakamura; First published: 11 November 2018 <https://doi.org/10.1002/app.47272>”*

A cikk szerzői meghatározták és összehasonlították a szakítószilárdság tesztelési sebességének hatását a nyomásérzékeny ragasztó (PSA) és a vulkanizált gumi tulajdonságaira. PSA-anyagként egy változó térhálósítású poli (n-butil-akrilát-akrilsav) véletlenszerű kopolimert használtak, melyben a keresztkötések mértékét és gyakoriságát változtatták. A vizsgálati eredmények alapján megállapították, hogy a PSA 100%-os modulusa növekszik a térhálósítás mértékével és a gyorsabb húzási sebesség alkalmazásával. Ezzel szemben a vulkanizált gumi 100%-os modulusa nem mutatott vizsgálati sebesség-függést. Ennek a hatásnak a kiértékeléséhez a kémiai és fizikai térhálósítási pontok közötti molekulatömeget egyensúlyi duzzadással, dinamikus mechanikai analízissel és szakítóvizsgálattal határozták meg. A fizikai térhálósítási pontok aránya sokkal nagyobbak bizonyult a térhálósított PSA-ban. Mivel ezek az összefonódási pontok a lassú deformációra reagálva könnyen szétválaszthatóak, a teszt sebességének változásai csak a PSA-t érintették. [1]

2. cikk: *Mechanical properties and swelling behavior of cross-linked natural rubber/chitosan blends; Jobish Johns and Vijayalakshmi Rao; International Journal of Polymer Anal. Charact., 14: 508-526. 2009.*

Ez a cikk a vulkanizált természetes gumi (NR) és a chitosan (CS) keverék felületi keménységével, az oldószer felvételével, a keresztkötés-sűrűséggel és diffúziós koeficienssel és szilárdsági tulajdonságaival foglalkozik; keresztkötést létesítő ágens-

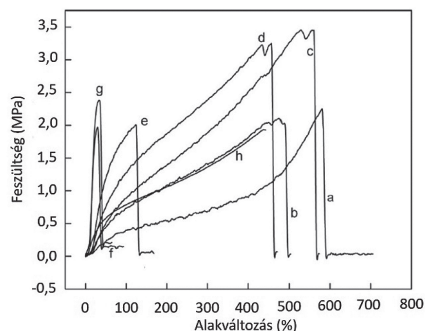
ként Dicumil-peroxidot használtak. Dicumil-peroxidot használtak, mint keresztkötést létesítő ágenst. A szilárdsági tulajdonságok tekintetében a keresztkötéseket tartalmazó természetes gumi sokkal magasabb szakítószilárdságot és Shore A keménységet mutatott, mint a nem vulkanizált minták. Megvizsgálták továbbá, hogy a hő hatására bekövetkező öregítés hogyan befolyásolja a vulkanizált keverék mechanikai tulajdonságait. A vulkanizált minták oldószerrel való ellenállóképességét az egyensúlyi duzzasztásos vizsgálattal ellenőrizték, mely során benzint használtak oldószerként. Mindezek mellett megvizsgálták a kitozán tömegarányának hatását a szállítási tulajdonságokra. A peroxiddal vulkanizált keverék javított oldószerrel szembeni ellenállóképessége biztosította a keresztkötések képződését a gumifázisban. A keverék csökkentett duzzadást mutatott, ami a szerkezet bonyolultságának, a csökkentett szabadúthossznak

1. táblázat. Szakítószilárdság és keménységértékek a vulkanizált és nem vulkanizált NR/CS-keverékeknél

Minta neve CS/NR	UTS (MPa)				Keménység (Shore A)	
	Nem vulkanizált		Vulkanizált (3pphr)		Vulkanizált (3pphr)	Nem vulkanizált
	Nem öregített	Öregített	Nem öregített	Öregített		
0/100	0,46	1,61	2,28	0,58	42	20
5/95	1,13	1,56	2,12	0,52	46	23
10/90	0,98	1,82	3,47	0,91	52	36
15/85	1,93	2,18	3,27	1,73	71	51
20/80	1,78	2,17	2,04	2,45	76	58
35/65	3,25	3,37	2,01	1,62	80	68
50/50	0,96	2,33	2,39	2,21	83	82

Az 1. táblázat a különböző keverékek szakítóvizsgálattal és keménységméréssel meghatározott eredményeit foglalja össze. Az első minta tisztán természetes gumi, melynek nem vulkanizált, vulkanizált, továbbá hőkezeléssel öregített, illetve nem öregített állapotában mutatja a szakítószilárdsági értékeket. A keverék összetétele oly módon változott, hogy a természetes gumihoz 5–10–15–20–35–50% mennyiségben adagoltak kitozánt. Az értékekből jól látszik, hogy már 5% kitozán közel háromszorosára növeli a nem öregített minta szilárdsági értékét, de az öregítés ezt a drasztikusan lecsökkenti. A kitozán mennyiségének növelése egészen 35% javítja a szakítószilárdság értékeit, de már az 50–50%-os keverék esetén is drasztikus csökkenés figyelhető meg. Ezeket a trendeket mutatják a következő diagramok ezeket a trendeket mutatják egy-egy változó függvényében.

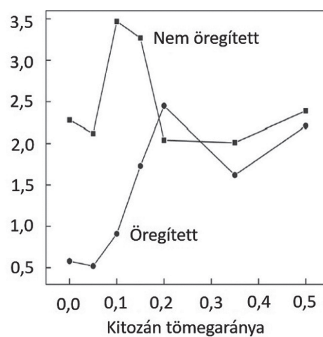
1. ábra. Vulkanizált minták feszültség és alakváltozás görbék



a) NR, b) NR95CS5, c) NR90CS10, d) NR85CS15, e) NR80CS20, f) NR65CS35, g) NR50CS50

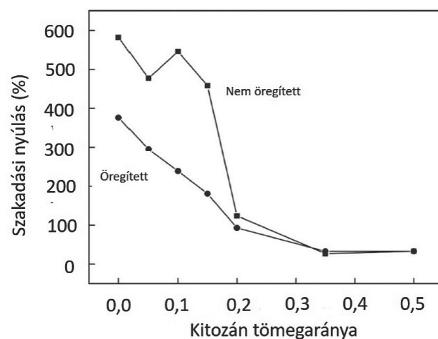
Az 1. ábra a felvett szakítódiagramokat mutatja az egyes keverékek esetén. A görbeseregéből kirajzolódik, hogy természetes gumi, valamint a 5, 10, 15% kitozán esetén a nyúlásértékek megőrzése mellett, illetve a kitozán mennyiségének növelésével a szakítószilárdság is növekszik. Ám a 20% feletti kitozánmennyiség drasztikus csökkenést okoz a nyúlásértékekben, és a szakítószilárdsági értékek is csökkenést mutatnak.

2. ábra. A termikus öregítés hatása az egyezményes szakítószilárdság-értékekre a kitozán tömegarányának függvényében



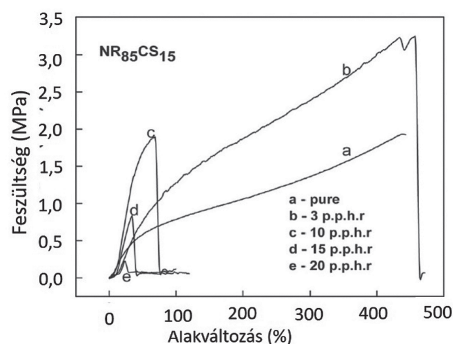
A 2. ábra az öregített és nem öregített állapotú keverékek szakítószilárdságát mutatja a kitozántartalom függvényében. A nem öregített minták esetén a maximális szakítószilárdságot a 10, illetve a 15% CS-tartalom esetén adja, míg öregítést alkalmazva a 20% kitozántartalom adja a maximumot. De ez a maximum messze elmarad a nem öregített állapotú minta 3,5 MPa értékétől.

3. ábra. A termikus öregítés hatása a nyúlásértékekre a kitozán tömegarányának függvényében



A 3. ábráról egyértelműen leolvasható, hogy 20% kitozántartalom elérését követően a nyúlásértékek drasztikus csökkenést mutatnak. Itt már az öregítés sem hat jelentősen a minták nyúlására, inkább a kitozántartalom a meghatározó.

4. ábra. Különböző DCP-koncentráció hatása az NR85CS15-keverékre



A 4. ábra a 15%-os kitozántartalomú minta szakítódiagramjait mutatja, ahol DCP-koncentráció-eltérések vannak. A diagramok egyértelműen mutatják, hogy a 10 vagy a feletti DCP- (dicumil-peroxid) koncentráció drasztikusan lecsökkenti a nyúlás- és a szakítószilárdsági értékeket. Ezeknél a mintáknál a keresztmetszések mennyisége ugrásszerűen megnő, így a polimer merevsége, ridegsége hirtelen növekszik.

A 2. táblázat a konkrét vizsgálati eredményeket foglalja össze a 15% kitozántartalmú természetes gumi-keverék esetében változó keresztmetszést elősegítő DCP-koncentrációnál.

2. táblázat. A szakítószilárdság, a szakadási nyúlás és a keménység alakulása a DCP mennyiségének függvényében

DCP mennyisége	UTS (MPa)		EAB (%)		Keménység (Shore A)
	nem öregített	öregített	nem öregített	öregített	
0	1,93	2,18	438	415	51
3	3,27	1,73	458	181	71
10	1,94	1,7	68	31	71
15	0,88	1,15	35	32	70
20	0,27	1,6	24	54	70

Az elvégzett szilárdsági vizsgálatok alapján a cikk szerzői megállapították, hogy a természetes gumi- és kitozánkeverék, melyet a keresztmetszést elősegítő dicumil-peroxiddal vulkanizáltak, nagyobb szilárdságot és keménységet mutat, a nyúlásértékek viszont csökkennek, ha összehasonlítják a nem vulkanizált mintákkal. A maximális szakítószilárdságot a vulkanizált, 10% kitozánt tartalmazó keverék esetén figyelték meg. Az öregítés egyedül a 20% kitozán esetén hatott kedvezően a szilárdsági értékre, a többi minta esetén csökkenést figyeltek meg.

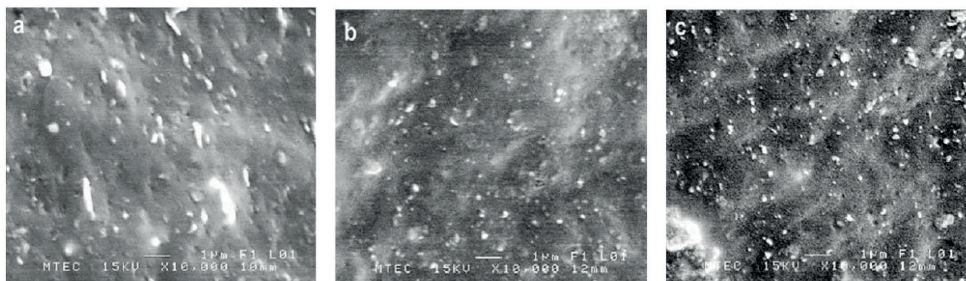
3. cikk: *Natural Rubber and Reclaimed Rubber Composites – A Systematic Reviewer; Mente P, Motaung TE, and Hlangothi SP, Polymer Sciences 2016, Vol. 2 No.1:7.*

A cikk áttekintést ad, olyan gumialapú kompozitanyagok szerkezeti és mechanikai tulajdonságairól ad áttekintést, amelyek különböző töltőanyagokat tartalmaznak (pl. agyag, feketeszen, szilika). A cikk átfogó tanulmány a természetes szákkal erősített gumikompozitok és a visszajáratott gumi szilárdsági, vulkanizálási, morfológiai és hőtani tulajdonságairól. A természetes száak alkalmazása a szálerősítő polimer kompozitokban az elmúlt időben vált érdekessé a kutatók, a mérnökök és a tudósok számára. Mindezt olcsóságuknak, kedvező mechanikai tulajdonságaiknak és nagy fajlagos szilárdsági értékeiknek, továbbá kevésbé abrazív, környezetbarát és biodegradábilis jellemzőiknek köszönhetik. A hagyományos száak

(üveg, aramid) helyettesítését ezekkel a természetes szálakkal tehát megoldották. A természetes szálakkal erősített kompozitok szilárdsági tulajdonságait főként a mátrix és az erősítő szál közti határfelületi adhézió befolyásolja. Számos kémiai módosítást alkalmaztak, hogy javítsák a mátrixerősítő szál közti határfelületi kötést és ezzel növeljék a kompozitok szilárdsági jellemzőit. Így egyre nagyobb figyelmet kapnak a polimerek és a természetes gumik. Ebben a cikkben fontos szerepet kap az egyre nagyobb környezeti problémát okozó elhasznált gumiabroncsanyagok élettartamának meghosszabbítása azzal, hogy visszajaratják ezeket a termékeket, mégpedig devulkanizálással.

Az 5. ábra azon a kompozit anyagok a felületét mutatja, melyek 6 phr (part per hundred rubber – száz gumiegységre vonatkoztatott arány) agyagot, fekete szenet és szilikát tartalmaznak. Ezek a felvételek pásztázó elektronmikroszkóppal készültek.

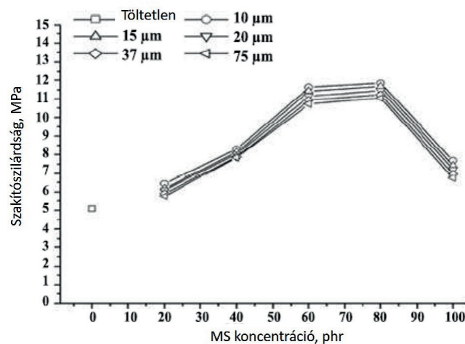
5. ábra. SEM-felvételek a 6phr agyaggal (a), korommal (b) és szilikával (c) töltött kompozitokról



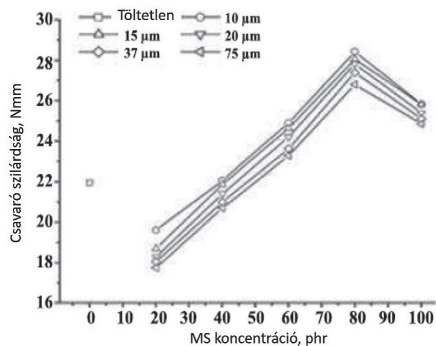
A 6. ábra a természetes gumikompozitok szakítószilárdságát mutatja a töltőanyag-mennyiség és szemcse-méret függvényében.

A keverékek szakítószilárdsága nem függ kizárólag a töltőanyag-terheléstől és a töltőanyag-részecske méretétől, de függ a szálorientációtól: ahol nagyobb mértékű a szálorientáció, ott a keverék nagyobb szakítószilárdságot mutat. A töltetlen mintához képest a 20 phr csekély mértékben módosít a szakítószilárdságon, de ha ennek mértéke 60 phr vagy afelett van, 80 phr-ig a szilárdság – függetlenül a részecskemérettől – több mint kétszeresére nő.

6. ábra. Természetes gumikompozit-anyagok szakítószilárdsága változó töltőanyag és részecske méret mellett

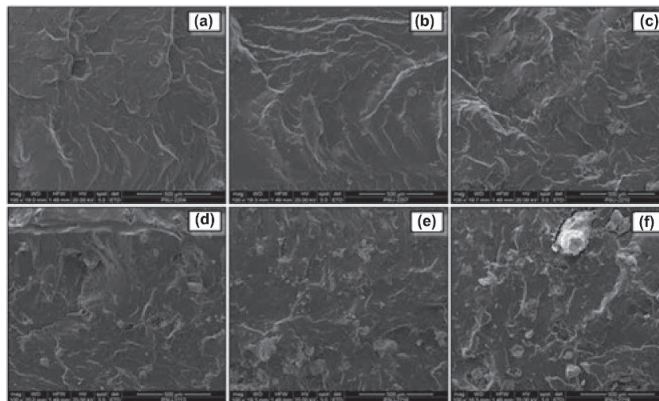


7. ábra. Csavarószilárdság-változás a természetes gumikompozitoknál, növekvő töltőanyag-terheléskor



A 7. ábra a szakadáskor mért feszültségértékeket mutatja a töltőanyag mennyisége és részecskeméretének függvényében. Itt azonban a 80 phr adja a maximumot addig folyamatos növekedés detektálható, ezt követően pedig csökkenés figyelhető meg.

8. ábra. SEM-felvételek (a) természetes gumi, (b) 5phr-töltővel erősített természetes gumikompozit, (c) 15 phr, (d) 25 phr, (e) 35 phr, (f) 45 phr



A 8. ábra a töltőanyag mennyiségének növelésével mutatja a minták felületét. Latható, hogy a töltőanyag phr-értékének növelésével a felület is egyre növekszik.

A gumianyagokban alkalmazott erősítőszálak javították a modulus értékét, a szakítószilárdságot, a szakadáshoz tartozó feszültségeket, és a szakadási nyúlást. A töltőanyagok jelenléte kimutatta a maximális csavarónyomatékokot, és csökkentette a beégési és vulkanizálási időt. A töltőanyag-mennyiség tekintetében általában két extrém véglet adható meg. Az alacsony kb. 3%, és a nagyon magas a kb. 20%, amelyek relatíve gyenge mechanikai tulajdonságokat eredményeznek. Az optimális tulajdonságok eléréséhez kb. 5–10% töltőanyag-mennyiség szükséges. A nedvesítési tulajdonságok javulnak a töltőanyagok adagolásával és romlanak a hőmérséklet növelésével, azonban a modulusromlás nem változik szignifikánsan a töltőanyag-adagolással.

A nedvesítési faktor és a tárolásimodulus-értékek bizonyították, hogy a keresztlinkések mértéke növekszik a töltőanyagok adagolásával, és ez a mennyiség növelésével tovább javul. A természetes gumi bomlási mechanizmusa nem változik a töltőanyagok adagolásával, de a bomlási hőmérséklet növekszik, ami azt jelenti, hogy a hozzáadott töltőanyag növeli az anyag hőstabilitását. A töltőanyagok bekeverése hatással van a kompozit felületi morfológiájára: ahol igen nagy a töltőanyag-mennyiség, ott gyenge a töltőanyag-részecskék diszperziója (eloszlatása), ami agglomerátumok, azaz csoportok képződését idézi elő. Ez látszik a pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken is, és ez adja az érdekesebb felületeket.

Ha a szűz gumihoz visszajáratott gumianyagot adunk, a visszajáratott anyag minősége, összetétele és gyártási eljárása erőteljesen meghatározza a kompozitanyagok tulajdonságait.

Az eddigi vizsgálatok alapján elmondható, hogy a visszajáratott gumianyagok alkalmazása javítja – késlelteti a termékek öregedési folyamatát. A gumikompozitoknál a keresztkötések és az adalékanyagok kombinációjának alkalmazása idézi elő a legnagyobb változásokat.

A visszajáratott gumi és a nyersgumi biomassza formájában történő alkalmazása hiányzó koncepció a gumikompozitok összeépíthetőségében. A természetes szálakkal erősített természetes gumi és a visszajáratott gumikompozitok megoldást jelenthetnek a környezeti szennyezésre és a gazdaságosságra. Ebből következik, hogy megérné törekedni arra, hogy ilyen összetett rendszereket lehetséges minél jobb tulajdonságokkal előállítani. A visszajáratott gumianyagok polimer keverékekben történő alkalmazását is meg kellene vizsgálni.

4. cikk: egy könyvrészlet: *Natural Rubber-Based Composites and Nanocomposites: State of the Art, New Challenges and Opportunities*; C. H. CHAN,^a JITHIN JOY,^b HANNA J. MARIA^b AND S. THOMAS.

A könyvrészlet 1.4. és 1.5. fejezete foglalkozik a részfeladat témájával, vagyis azzal, hogy milyen természetes adalékanyagokat lehet alkalmazni a gumikeverékekben, és ezek milyen hatással vannak a keletkezett összetett anyag tulajdonságaira. Ezeket az összetett anyagi rendszereket a szakirodalom kompozitanyagoknak hívja és mivel az adalékanyagok szemcse/részecskemérete mikron alatti, ezért nanokompozitokról beszélünk. A mátrixanyag sok esetben a braziliai hevea brasiliensis (kaucsukfa) kéreg alatti nedveiből előállított nyers/természetes gumi (NR), de manapság már mesterséges, azaz polimerekből előállított gumianyagokat is alkalmaznak. Ilyen pl. a butadién-sztirol, vagy csak sztirolalapanyagok felhasználása, melyek rendre a BSR-, vagy SR-alapanyagokat adják. A cikk első körben a természetes gumikompozitokat taglalja. Így szó esik az NR-kompozitokban alkalmazott adalékok előnyös hatásairól, arról, hogy az NR mátrixában lévő töltőanyag-erősítésnek köszönhetően a termékek anyagköltségei csökkenthetők, a kívánt tulajdonságok javíthatóak és az NR feldolgozási folyamatai is optimalizálhatóak. Az NR-nél használt, kereskedelemben is kapható töltőanyagok a fekete szén/korom (CB), a szilika (SiO₂) és a kalcium-karbonát stb. Az NR-alapú gumiabroncs-ipart úgy ismerik, mint a nanoméretű kormot felhasználó vezető ágazatot. A korom az elsőszámú erősítő adalék a NR-alapú kompozitok számára. Az NR-alapú gumiabroncsokhoz adagolt korom csökkenti a járművek üzemanyag-felhasználását, mivel csökkenti a gördülési ellenállást. Általában a hagyományos töltőanyagok nagy mennyiségének adagolása, azaz kb. 40%-a kívánatos, hogy meg lehessen valósítani az autóalkatrészek számára optimális mechanikai tulajdonságokat. Az adagolt töltőanyagok nagy mennyisége csökkentheti az anyagok gyárthatóságát, növelheti a termék súlyát éppúgy, ahogy növelheti a törekenységet, továbbá hatással van a végtermékek átlátszóságára is. Ez vezetett ahhoz a folyamatos problémához, hogy új, költséghatékony és kis tömegű NR-kompozitokat fejlesszenek ki egyre jobb és jobb tulajdonság-kombinációkkal. Ezeknek a kompozitoknak az előállításához új gyártási módszereket is megalkottak, úgymint a keverési technológiákat, azon belül is a kéthengeres keverőket, az őrlemények keverését, az oldatban való keverés technológiáját, az ömledékkeverést, és a koagulációt.

Ezekről a technológiákról az alábbi publikációk adnak részletesebb leírásokat:

Örlemények keverése:

- J. B. Donnet, Compos. Sci. Technol., 2003, 63, 1085.
- M. A. Lo´pez-Manchado, J. Biagiotti, L. Valentini and J. M. Kenny, J. Appl. Polym. Sci., 2004, 92, 3394.
- Q. Liu, Y. Zhang and H. Xu, Appl. Clay Sci., 2008, 42, 232.
- H. Ismail and R. Ramli, J. Reinf. Plast. Compos., 2008, 27, 1909.
- J. Carretero-González, H. Retsos, R. Verdejo, S. Toki, B. S. Hsiao, E. P. Giannelis and M. A. Lo´pez-Manchado, Macromolecules, 2008, 41, 6763.

Oldatban való keverés:

- M. Ganter, W. Gronski, P. Reichert and R. Mu¨lhaupt, Rubb. Chem. Technol., 2001, 74, 221.
- M. Pramanik, S. K. Srivastava, B. K. Samantaray and A. K. Bhowmick, J. Appl. Polym. Sci., 2003, 87, 2216.
- R. Stephen, S. Thomas, K. V. S. N. Raju, S. Varghese, K. Joseph and Z. Oommen, Rubber Chem. Technol., 2007, 80, 672.
- R. Stephen, S. Varghese, K. Joseph, Z. Oommen and S. Thomas, J. Membr. Sci., 2006, 282, 162.

Ömledék keverés:

- Y. T. Vu, J. E. Mark, L. H. Pham and M. Engelhardt, J. Appl. Polym. Sci., 2001, 82, 1391.

Koaguláció:

- P. Danwanichakul, R. Werathirachot, C. Kongkaew and S. Loykulnant, Eur. J. Sci. Res., 2011, 62, 537.

ADALÉKANYAGOK HATÁSAI

Koromadalékok

A korom (CB) vitathatatlanul a legszélesebb körben alkalmazott erősítő töltőanyag az NR-készítményekben. Javítja az NR-alapú anyagok húzó- és szakítószilárdságát, modulusát és keménységét, kopás- és hőoxidációs ellenállását stb. A CB-t különféle eljárásokkal állítják elő – beleértve a csatornaeljárást is –, hogy különböző kormot állítsanak elő (ilyen pl. a kemencefekete, a termikus fekete, a lámpafekete és az acetilén fekete). Az NR-alapú kompozitok és a nanokompozitok CB hozzáadásával monoton fekete színt mutatnak a késztermékekben. Megfigyelték továbbá, hogy az NR-nanokompozitoknál (átlagos részecskeméret 30

nm) a CB- (N330) adagolás mechanikai tulajdonságaik javulását eredményezi a nem adalékolt polimerhez képest. A vulkanizált nanokompozitok szakítószilárdsága 50 tömeg% CB-töltőanyag-adagolással 20,6-ról 22,1 MPa-ra nő. A szakadási nyúlás azonban ellentétes tendenciát mutat, 973-ról 573%-ra csökken. Számos publikáció vizsgálta a CB (N234) NR-mátrixra gyakorolt hatását is. Más szerzők publikációiban is hasonló megfigyeléseket rögzítettek a korom mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását illetően. Így pl. a vizsgálatok során 21,2 MPa-nyomáson mért szakítószilárdságnál és 50 tömeg% töltőanyag-adagolásnál a szakadási nyúlás csökkenéséről számolnak be. A CB-t gyakran használják más töltőanyagokkal együtt, hogy hibrid töltőanyagokkal tovább tudják javítani a késztermék mechanikai tulajdonságait. Liu és társai a nanoszintált CB-t és poli(etilén-glikollal – PEG) módosított agyagot adtak NR-nanokompozitjukhoz. A vizsgálati adatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a hibrid töltőanyagokkal rendelkező NR sokkal jobb mechanikai tulajdonságú, mint azok a minták, melyekben az NR-hez csak CB-t adalékolnak. Rattanasom és társai arról is beszámoltak, hogy a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás 15,3-ról 25,4 MPa-ra, illetve 460-ról 605%-ra nő a CB-vel töltött NR-hez képest, ha az NR-hez hibrid töltőanyagokat azaz CB-t és módosított agyagot adtak.

További vizsgálati eredmények a koromadalékolt gumikompozitok esetén:

1. *EkoprenaTM as a reinforcement modifier for graphene oxide/carbon black filled natural rubber*; Nik Intan Nik Ismail és társai; <https://www.researchgate.net/publication/3253338884>; 2018 május

3. táblázat. Gumikompozitok mechanikai tulajdonságai

Mechanikai tulajdonságok	NR/GO/CB
Szakítószilárdság, MPa	22,9±1,01
Szakadási nyúlás, %	848±7,57
M1000, MPa	1,2±0,03
M300, MPa erősítési index	3,2±0,08
M300/M1000	2,62±0,08
Keményység, IRHD	56,7±0,02
Abrázív ellenállási index, %	57,5±0,02

A cikkben közölt szakítószilárdsági érték (3. táblázat) közel azonos, mint a korábbi publikációban megadott érték, de itt hibrid töltőanyagot keverték a természetes gumiba, az ugyanis a korom mellett grafén-oxidot is tartalmaz.

2. Formulation, Preparation, and Mechanical Characterization of Nitrile-Butadiene Rubber (NBR) Composites; Noor Aldeen Bawadukji and Rafi Jabra; Materials Science: An Indian Journal, Research Vol. 15, Issue 1.

Ebben a cikkben többféle adalékanyaggal készített mesterséges gumikeverékeket vizsgáltak. Most csak a korommal adalékoltakat emeltem ki. A korom mennyiségét a nitril-butadién gumiban a táblázat tartalmazza, mely szerint a mesterséges gumi száz gumiegységre vonatkoztatva 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 és 100 CB-t tartalmazott. A keverékek vizsgálati adatai alapján az látszik, hogy a szilárdsági értékek 50 CB-ig a szakítószilárdság, illetve a nyúlásértékek tekintetében is nőnek, ezt követően drasztikus romlás következik be, ami a korom-agglomerátumok megjelenésével magyarázható. Az ebben a cikkben szereplő 50% CB-töltöttség adja a maximális szilárdságot, ami közel azonos, mint a korábbi cikkekben közölt érték.

4. táblázat. Természetes alkotók aránya az NBR-gumiban

Alkotók	(phr)
NBR Krynac 3370F	100
ZnO	3
IPPD	1
DPG	1
Korom N330-csoport	0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100
Aetosil 200 nano-szilika csoport	0, 10, 20, 30, 40, 50, 75
Természetes vulkanikus tuffa csoport	0, 10, 30, 50, 75
Sztearinsav	2
DOP	10
Szulfin	2,5

5. táblázat. NBR Krynac3370F-kompozit-minták mechanikai tulajdonságai

Minta	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Szívósság (J)	Keménység (Shore A)
NBR	2,25	182	0,5	53
NBR10C	4,83	366	1,82	55
NBR20C	7,03	412	3,08	61
NBR30C	12,58	452	6,31	65
NBR40C	19,21	479	10,06	67
NBR50C	20,48	484	9,94	75
NBR75C	18,02	274	6,69	85
NBR100C	14,08	109	2,51	86

Agyadalékok alkalmazása, és tulajdonságmódosító hatásuk

Az agyag (módosítatlan) évek óta fontos NR-töltőanyag, de nagy mérete és alacsony felületi aktivitása miatt az erősítő képessége gyenge. A réteges szilikátok (LS) a talaj és az agyag fő aktív ásványi anyagai. Ezek a legszélesebb körben használt 2D nanotöltőanyagok (rétegenkénti szétválasztás és/vagy interkaláció után), melyek két egymáshoz kapcsolódó szilikát-tetraéder réteg között egy fématomot tartalmazó oktáédert tartalmaznak, például Al- vagy Mg-atomokkal. A rétegeket gyenge dipól-dipólus erő köti egymásra, és kifelé negatív töltést mutatnak, melyeket a rétegek közötti terekben elhelyezkedő kationok, mint a Na és a Ca semlegesítenek. Mivel a rétegeket összetartó erők viszonylag gyengék, a kis molekulák interkalációja a rétegek között könnyen elvégezhető. Az LS rétegenkénti szétválasztott nanorétegei azonban a polimerek többségében nem könnyen diszpergálhatóak, mivel az agglomerálódott kétdimenziós (lapszerű) részecskék egymáshoz viszonyított párhuzamos elrendeződéseiben a lap-lap-kapcsolatot előnyben részesítik. A taktoidok diszkrét egyréteggé történő diszperzióját tovább gátolja a hidrofíls LS- és a hidrofób NR-mátrix belső összeegyeztethetatlensége. Ezért az LS-t szervesen módosítani kell, hogy polimerrel kompatibilis agyaggá vagy szerves gyűrűkké váljanak. Ezt jól bizonyították, ha az LS üregeiben vagy „galériájában” lévő szerves töltéssel rendelkező kationokat alkil-ammónium felületaktív anyagokkal helyettesítették.

Kis mennyiségű szerves réteg bejuttatása a vulkanizált NR-be lényegesen javíthatja a mechanikai tulajdonságokat, például a szakítószilárdságot, a modult, a keménységet, a kopásállóságot, a szakadási feszültséget és az oldószerállóságot, az égési ellenállóképességet, a gáztárolási tulajdonságokat és a NR-mátrix biokompatibilitását. A töltőanyag mennyiségét phr-ban (részek wt/100 résztömeg/szárazgumi) fejezik ki, a korom CB-(SPHERON 6400) helyettesítőjeként pedig oktadecilamin-módosított montmorillonitot (organo-MMT) alkalmaznak.

6. táblázat. Mechanikai tulajdonságok különböző töltőanyagok használatával készült kompozitok esetén

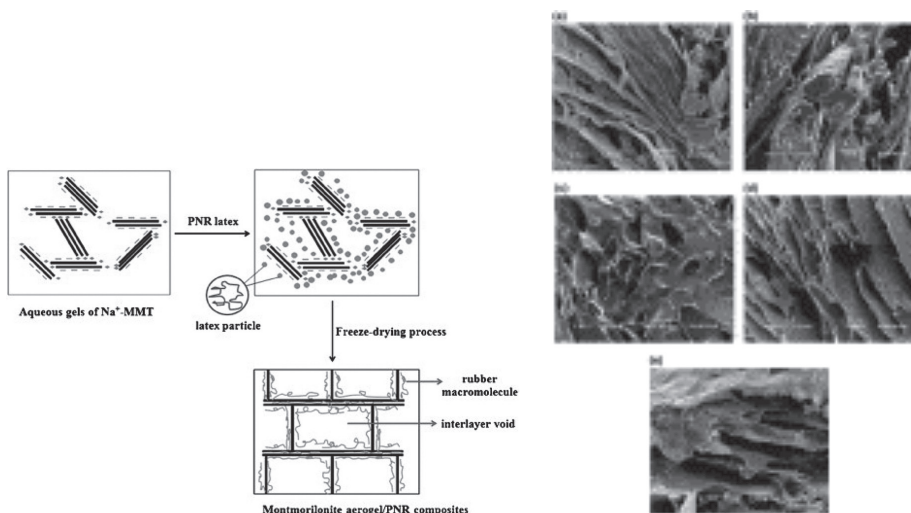
Mechanikai tulajdonságok	NR	NR/Na+ -MMT (10phr)	NR/szer- ves MMT (10phr)	NR/CB (10phr)	NR/CB (40phr)
Szakadási nyúlás (%)	700	555	700	464	434
Keménység (Shore A)	28,8	20,7	43,5	30,5	38,3
Kopási veszteség (mm ³)	286,2		217,5	282	199,3
Alakváltozási modulus 100% (MPa)	0,59	0,53	1,72	0,83	1,6

A 6. táblázat adatai alapján jól látszik, hogy a 10 egység Na-MMT-t tartalmazó gumikompozit tulajdonságai rosszabbak, mint a természetes gumié, de ha szerves bevonattal ellátott montmorillonitot alkalmaznak, a szakadási nyúlás azonos, a keménység jobb, mint a természetes guminál mért érték.

A kompozit szerkezetépítő mechanizmusait, illetve a valódiszerkezet SEM-felvételeit mutatja a 9. ábra. [2]

[2] Mechanical, rheological, and swelling behavior of natural rubber/montmorillonite aerogels prepared by freeze-drying; *Applied Clay Science*, Volume 50, Issue 2, October 2010. Pp. 271–279.

9. ábra. Montmorillonit beépülési mechanizmusa és SEM-felvételek a kompozitokról

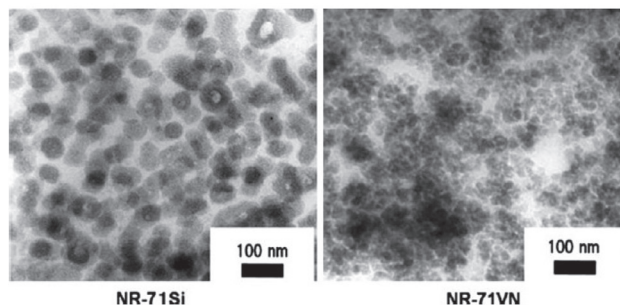


Szilika-adalékok alkalmazása és szilárdsági tulajdonságokra gyakorolt hatása

A szilícium-dioxid (SiO_2) egy kiváló, nem fekete, gömb alakú erősítő töltőanyag, melyet széles körben alkalmaznak színes NR-termékek előállítására. Alacsony hőfelhalmozódása és gördülési ellenállása miatt különösen a környezetkímélő, zöld gumiabroncs futófelületén használják. A SiO_2 különféle módszerekkel állítható elő, például vizes nátrium-szilikátoldat kicsapása, pirogénus eljárással füstölt szilícium-dioxid, természetes erőforrásokból származó szilícium-dioxid (pl. Rizshéj hamu⁷⁴ és pernye⁷⁵) és/vagy szilícium-dioxid-szol szol-gél eljárással. Ikeda és mtsai. mind nano- SiO_2 -tal töltött NR-kompozitot (NR-71Si), mind kereskedelmi kovasavval (Nipsil VN-3) töltött NR-kompozitot (NR-71VN) készítettek. NR-71Si-t készítettek nano- SiO_2 -vel (100–400 nm átmérőjű) in situ-módszerrel tetraetoxi-szilán szol-gél reakciójával, körülbelül 80 phr-ig. Az NR-71VN-t hagyományos módszerrel állították elő, 71 phr SiO_2 -tartalommal. Az in situ módszerrel előállított nano- SiO_2 és az NR-mátrix közötti nagy kölcsönhatás miatt az NR-71Si szakító-szilárdsága nő az NR-71VN-hez képest. Az NR-71Si kisebb feszültséget mutat a 200%-os megnyúlásig, és nagyobb feszültséget mutat a 200%-nál nagyobb megnyúlásnál. A hagyományos SiO_2 -val töltött NR nagy

modulusa kis nyúlásnál a SiO_2 nagyobb aggregátumainak kialakulásának köszönhető. Az in situ előállított nano- SiO_2 kiváló erősítő hatást mutat az NR-vulkanizátumokra. Az in situ nano- SiO_2 és kereskedelmi célú SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) képeit mutatja a következő ábra.

10. ábra. Nano- SiO_2 és kereskedelmi SiO_2 -vel töltött NR-vulkanizátumok



A 10. ábrán látható, hogy az in situ-generált nano- SiO_2 x diszperziója a természetes gumimátrixban jobb, mint a kereskedelmi forgalomban lévő SiO_2 diszperziója az NR-mátrixban.

Arun és társai 78 nano- SiO_2 és SiO_2 -mal töltött NR nanokompozitokat és kompozitokat ko-vulkanizálási módszerrel készítettek. Összehasonlították az NR-kompozitok mechanikai tulajdonságait a megfelelő nano- SiO_2 -tal töltött NR-vel. Vizsgálati eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy alacsony töltőanyag-terhelés mellett (0,8 phr) a nano- SiO_2 jól diszpergálódott az NR-ben, ami valószínűleg a javított NR és a nano- SiO_2 közti kölcsönhatásnak köszönhető. A SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok esetében a szakítószilárdság kezdetben kissé növekszik, majd folyamatosan csökken, amikor a SiO_2 mennyiségét 5 phr-ról továbbnövelik. Ennek az lehet az oka, hogy gyenge a NR és SiO_2 közti kölcsönhatás, valamint a töltőanyag-eloszlás kissé egyenetlen. De a nano- SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok esetében a szakítószilárdság fokozatosan növekszik, és 0,8 phr nano- SiO_2 hozzáadásával eléri a 35 MPa maximális értéket, majd kissé csökken. Ha összehasonlítjuk a kapott vizsgálati eredményeket, akkor a nano- SiO_2 -val töltött NR maximális szakítószilárdsága nem a nagyobb (10 phr) töltöttségek esetén, hanem az alacsonyabb (0,8 phr) töltőterhelésénél figyelhető meg. A SiO_2 mennyiségének növekedésével a SiO_2 -val töltött NR esetén csökken a szakadási nyúlás. A nano- SiO_2 -val töltött NR esetén azonban a szakadási nyúlás folyamatosan növekszik, és eléri az 1550%-os maximális értéket, majd csak ezt követően figyelhető csak meg csökkenés. A szakadási nyúlás maximális értékét a nano- SiO_2 töltőanyag-töltés alacsony szintje mellett mérték (0,8 phr), összehasonlítva a SiO_2 töltőanyag-töltet (2,5-10 phr) értékével.

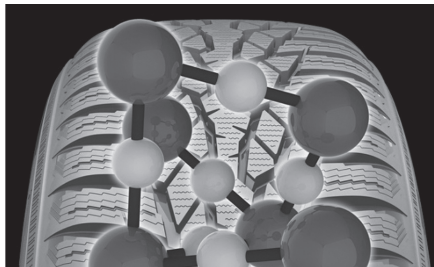
Ennek az lehet az oka, hogy a nano-SiO₂ és a javult NR-nano-SiO₂ határfelületi kötés is homogénen oszlik el az NR-mátrixban.

Idrus és társai a töltőanyagként használt ultrafinom SiO₂ különböző szemcseméretének hatását vizsgálták a vulkanizált NR tulajdonságaira. A Hosokawa Alpine osztályozó módszerrel, 50 ATP-vel kényszerített örvény osztályozó alkalmazása mellett három töltőanyagformát (kőbös, hosszúkás és szabálytalan, 1,25

mm, 1,18 mm és 1,18 mm átlagos szemcsemérettel) állítottak elő. Abban az esetben, ha a töltőanyag adagolását 10-ről 20 phr-re növelik, az SiO₂ mindhárom alakja növekvő szakítószilárdságot, szakadási nyúlást, keménységet (part A) és a 100%-os nyúláshoz tartozó alakítási modulust mutat. A mechanikai tulajdonságok javulását az adott töltőanyag-tartományban az SiO₂ jobb diszperziója teszi lehetővé. Nagyobb SiO₂-terhelésnél (30 phr) azonban a SiO₂ – NR kölcsönhatások SiO₂ – SiO₂ kölcsönhatásokkal való helyettesítése gyengébb szakítószilárdsághoz vezethet. A szabálytalan SiO₂-val töltött NR általában nagyobb szakítószilárdságot, szakadási nyúlást, szakítómodulust és keménységet mutat, majd ezt követi a hosszúkás és kőbös SiO₂-val töltött NR. Ennek az lehet az oka, hogy a szabálytalan SiO₂-nek nagyobb a felülete, amely nagyobb érintkezési/kötési felületet biztosít a SiO₂ és az NR-mátrix között; ezért pozitív erősítőhatás figyelhető meg.

Ezeknek a gumikeverékeknek a felhasználását mutatja és alkalmazza a Nokian Twin Trac Silica (11. ábra) gumikeverékében a Nokian Tyres Manufacturing Company.

11. ábra. Nokian Twin Trac Silica



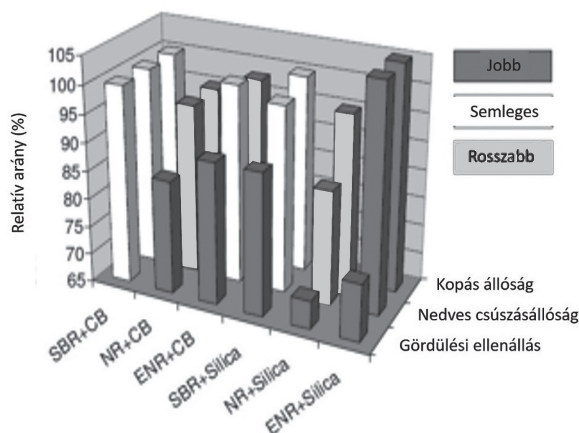
A természetes kaucsukot, szilícium-dioxidot és repceolajat tartalmazó Nokian Twin Trac szilícium-dioxid-kaucsuk-keverék egyedülálló részecskeeloszlása biztosítja a csúcsapadást a havas és nedves utakon. Ez a korszerű összetett újítás javítja a vezetési stabilitást és a kopásállóságot is. A nagy mennyiségű természetes kaucsuk és repceolaj biztosítja, hogy a kiváló téli tapadási tulajdonságok a hőmérséklet változása és a kilométerek összeadódása mellett is változatlanok maradjanak. Az extrém kis gördülési ellenállás alacsony üzemanyag-fogyasztást biztosít.

12. ábra. Performance Traction Silica



A Performance Traction Silica (12. ábra) a természetes kaucsukot, szilícium-dioxidot és repceolajat tartalmazó gumikeverék kiváló téli tapadást biztosít. Ez a korszerű összetett újítás javítja a vezetési stabilitást és a kopásállóságot is javítja. A repceolaj szakítószilárdságot biztosít. A szakítószilárdság miatt a gumiabroncs rendkívül ellenálló a kopásnak, ütéseknek és defektnek. A nagy mennyiségű természetes kaucsuk és repceolaj biztosítja, hogy a kiváló téli tapadási tulajdonságok változatlanok maradjanak a hőmérséklet változása és a kilométerek összeadódása mellett is. A rendkívül alacsony gördülési ellenállás alacsony üzemanyag-fogyasztást eredményez.

13. ábra. Keverékek kopásállósága, nedves csúszásállósága és gördülési ellenállása



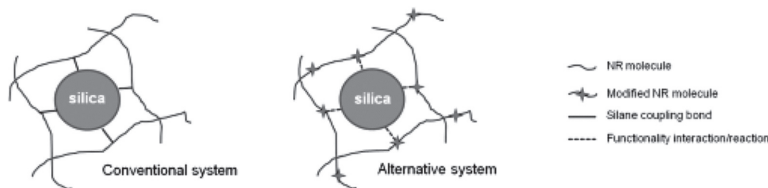
[3] https://www.utwente.nl/en/et/trc/projects/Silicates_modifiedrubber/

Mindezek mellett további kutatási projektek folynak a szilika és a természetes gumi minél jobb határfelületi kötéseinek kialakítása érdekében. Az alábbi oszlopdiagram azt mutatja, hogy a természetes és a mesterséges gumiba kevert korom, illetve szilika, hogyan segíti vagy éppen rontja a gumiabroncs kopásállóságát, a gördülési ellenállást (ez az üzemanyagfogyasztással van szoros összefüggésben), és a nedves utakon való megcsúszási valószínűséget. A diagram adatai alapján elmondható, hogy a gördülési ellenállás csökkentését mindegyik keverék elősegíti (13. ábra), a gondok azonban a nedves utakon való megcsúszásnál és a kopásállóságnál jelentkeznek. Ennél a paraméternél a természetes gumi a korom- és szilika-adalékkal egyaránt rosszul viselkedik. Míg ugyancsak ezek a keverékek adják a rosszabb kopásállóságot is, kiegészülve az ENR+CB- (epoxidált természetes gumi+ korom) keverékkel. [3]

A kutatási projekt célja az, hogy javítsák a gumi fogyasztásának >40%-át képviselő NR és az adalékanyagok kölcsönhatásait, ugyanis a szilícium-dioxid-technológia és az NR kombinációja révén környezetbarátabb gumiabroncsokat lehet előállítani. Az NR a fenntartható energiatermelés egyik legideálisabb példája, ahol a világ hatalmas területein a levegőből CO_2 kerül e természetes polimer előállításához, és a fák élettartamuk után bútorgyártásra használják.

A szilika-adalékokat a természetes gumihoz szilán-kötésekkel kapcsolják hozzá, mivel ezek képesek javítani a gumi feldolgozhatóságát és a szilícium-dioxiddal töltött gumitermékek általános tulajdonságait. A módosított NR-ekkel történő helyettesítés megfontolható az optimális tulajdonságok keresése és kapcsolószer használata nélkül. Ugyanis a minél több kémiai kötés és bevitt anyag, s így a közöttük kialakuló kémiai/fizikai kölcsönhatások befolyásolják a gumi tulajdonságait. A célkitűzés olyan technikák feltárása, amelyek elősegítik a jobb szilícium-dioxid-gumi kölcsönhatást vagy reakciót, és így a gyártástechnológia továbbfejlesztését biztosítják.

14. ábra. Kötések kialakulási mechanizmusa



Megcélzott reakciók/kölcsönhatások kialakítása a szilanizált és a funkcionizált szilikával módosított NR-rendszer esetén (*For more information regarding this project, contact W. Kaewsakul MSc*)

Kalcium-karbonát alkalmazása és hatása

A kalcium-karbonátot (CaCO_3) (vékonybajszú tőkehal) széles körben használják nem erősítő és erősítő töltőanyagként, hogy az NR-alapú kompozitokban a kívánt szint tudják produkálni és csökkentsék a termék költségeit. A CaCO_3 két fontos típusa az őrlött mészkő és a kicsapódott CaCO_3 .

Az őrlött mészkövet ásványi mészkő őrlésével állítják elő, és a kicsapódott CaCO_3 -ot sóoldatból kémiai kicsapással nyerik. Az őrlött CaCO_3 hozzáadásával az NR alacsony szakítószilárdságot eredményez, ugyanakkor a kicsapódott, esetenként kisebb részecskeméretű CaCO_3 növeli az NR-termék szakítószilárdságát.

Számos kutató tanulmányozta már a CaCO_3 -erősített NR-kompozit gyógyulási és fizikai-mechanikai tulajdonságait. Kutatásaik során $3,25\ \mu\text{m}$ átlagos részecskeméretű CaCO_3 -at használtak. Az NR-ben lévő 20 phr CaCO_3 -mal rendelkező kompozitok szakítószilárdsága 13,4 MPa, a szakadási nyúlás pedig 825%. Az NR-mátrixban a magasabb CaCO_3 -tartalom a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás csökkenését okozza. A CaCO_3 töltőanyagként történő használata javítja az öregedési viselkedést és a fizikai-mechanikai tulajdonságait a γ -besugárzással szemben. Kutatásokat folytattak a CaCO_3 -mal megerősített NR-kompozitokkal, melyek átlagos részecskeátmérővel $1,55\ \mu\text{m}$ volt. A vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a 15 phr CaCO_3 hozzáadásával a szakítószilárdság 24,8 MPa-ra, a nyírási szilárdság pedig 70 kN/m-re növekszik. Azonban ha a CaCO_3 mennyisége meghaladja a 15 phr-t, a mechanikai tulajdonságok fokozatosan csökkennek. A CaCO_3 NR-mátrixba történő növekvő terhelésével a szakadási nyúlás szintén csökkenést mutat.

Fémrészecskék alkalmazása gumikeverékekben

Köztudott, hogy egy szigetelő közeg dielektromos tulajdonságai – pl. Az NR – úgy módosíthatóak, hogy az elektromosan vezető részecskéket a közegbe dispergáljuk. A szigetelő gazdaanyag a közegben dispergált fémrészecskék mennyiségétől függően vezetővé vagy félvezetővé alakítható.

Fémes mágneses töltőanyagként használják pl. a ferromágneses vas-, nikkel- és kobaltrészecskéket stb. A nikkelrészecskék kémiaiilag stabilabbak, mint a vas és a kobalt, ezért azokat jobban alkalmazzák. A szakirodalomban – különböző mennyiségű nikkelrészecskék beépítésével – a NR/nikkel-kompozit mágneses tulajdonságaival is foglalkoznak. A vizsgálati eredmények alapján azt állapították meg, hogy a kompozitok

ferromágneses viselkedést mutatnak, és a telítettség mágnesezettsége növekszik a nikkeltartalommal. A dielektromos permittivitás a nikkeltartalom növekedésével nő, és a hőmérséklet emelkedésével csökken. A 7. táblázat a vulkanizált NR különböző nikkeltömegeinek mágnesezettségét és mechanikai tulajdonságait szemlélteti. A vulkanizált NR mágneses tulajdonságainak növekedése egyértelműen azt mutatja, hogy a nikkelrészecskék ferromágneses jellemzői megmaradnak a kompozitokban. A minták rugalmassági modulusa a kompozitok nikkeltartalmának növelésével javulást mutat. Az alakváltozási modulus növekszik a nikkel mennyiségének növekedésével, ami igazolja a nikkel nanorészecskék erősítő hatását a NR-mátrixban. A töltőanyag-terhelés növekedésével azonban a szakadási nyúlás monoton módon csökken. Mindez a töltőrészecskék NR-mátrixban történő csoportosulásaival magyarázható.

7. táblázat. Ni különböző mennyiségének hatása a vulkanizált NR mechanikai tulajdonságaira

Nickel-koncentráció (phr)	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)	100% alakváltozáshoz tartozó modulusz (MPa)
0	28,9	1210	0,75
20	26,7	1102	0,8
40	22,8	930	0,91
60	21,6	858	1,1
80	20,5	858	1,1
100	19,2	764	1,4

A 7. táblázatban látható, hogy a nikkelrészecskéket nem tartalmazó minták esetén a szakítószilárdság 28,9MPa, a szakadási nyúlás 1210%, és az alakváltozási modulus – 100% alakváltozás esetén – 0,75MPa. Ehhez képest, kis mértékben, már a 20 phr Ni-mennyiség is növeli az alakváltozási moduluszt, és csökkenti a szakítószilárdság- és szakadásnyúlás-értékeket. Ha a nikkel mennyiségét 5-szörösére növelik, akkor a szakítószilárdságban 34%-os csökkenés figyelhető meg, ugyancsak csökken a szakadási nyúlás (37%-kal) ugyancsak csökken, míg az alakváltozási modulus közel kétszeresére nő.

Bioalapú adalékanyagok alkalmazása a gumiabroncsokban

Az anyagok fenntarthatósága az ipar és az egyetemi intézmények kutatásának fejlesztésében az egyik legfontosabb kérdés. A nem ásványolaj-alapú töltőanyagok keresése felgyorsította a biomasszából származó bio-nanotöltők kutatását. Bizonyos esetekben a bioalapú nanokompozitok egyedülálló előnnyel

rendelkeznek a hagyományos szervesetlen nanorészecskékkal szemben. Az NR-ben általánosan használt bio-nanotöltőanyagok a cellulóz, a kitozán, a keményítő nanokristályai stb. Ezenkívül a kutatók remélik, hogy az NR-mátrixban történő diszpergálás után a bioalapú töltőanyagok biokompatibilitása és biológiai lebonthatósága megmarad.

KITINKRISTÁLYOK

A kitin a második leggyakoribb félkristályos poliszacharid. A kitin természetes forrásai közé tartozik a kagylók külső csontváza (a garnélarák vagy a rákhéj 8, illetve a 33% kitint tartalmaz), a rovarok és a sejtfalak rostos anyagai a gombákban és az algákban. A kitin makromolekulák N-acetil-D-glükózamin egységekből állnak. A kitin nem mérgező, szagtalan, biokompatibilis az élő szövetekkel, és biológiailag lebontható. A kitin amorf részének eltávolítása kristályos kitin-nanokristályok vagy kitin kristályok előállításához vezet. A szakirodalomban fellelhető adatok alapján a kitint rákhéjból történő savas hidrolízissel készítik, melyek vékony párhuzamos csövekből felépülő kitinkristályok.

A kitinkristályok NR-mátrixban történő alkalmazása a nanokompozitok modulusát, hőstabilitását és mechanikai tulajdonságait is javították. Becslések szerint a kitin-egy kristályok átlagos hossza és szélessége kb. 240, illetve 15 nm körül volt, a nyújtottságuk közel 16.

A szakítóvizsgálati eredmények alapján a kitin-egy kristályok alacsonyabb erősítő hatást mutatnak a vulkanizált NR-mátrix esetében, mint a vulkanizálatlan rendszerekben. Ennek az lehet az oka, hogy az NR-mátrix térhálósítása zavarja az egy kristályok háromdimenziós hálózatának kialakulását.

A kitin-egy kristályok jelenléte az NR-mátrixban a modulus jelentős növekedését eredményezheti anélkül, hogy a szakadási nyúlás jelentősen csökkenne. Erősítő hatásuk nagyban függ attól, hogy képesek-e egy merev, háromdimenziós hálózatot kialakítani, mely erős kölcsönhatásokból, például az egy kristályok közötti hidrogénkötésekből adódik.

A kutatási projektek arra is törekednek, hogy elérjék a nanorészecskék és az alpmátrix közötti jobb határfelületi kötések kialakulását, miáltal erősítő hatásukat a nanorészecskék még intenzívebben tudják kifejteni. Ilyen adalékanyag, felületmódosító lehet pl. a fenil-izocianát (PI), az alkenil-borostyánkősav anhidrid (ASA), a 3-izopropenil-R, illetve az R0-dimetil-benzil-izocianát (TMI), melyek alkalmazásával kémiai módon módosítják a kitin-egy kristályokat. Ezeknek az NR-kompozitoknak a mechanikai teljesítménye azonban a kémiai módosítás után jelentősen csökkent. Ennek az lehetett az oka, hogy a kitin-egy kristályok háromdimenziós hálózata részlegesen vagy teljesen megsemmisült, amit a módosítatlan kompozitok esetében feltételeztek. Néhány kutató kitozánnal töltött NR-vegyületeket állított elő 90 µm átlagos részecskeméretű kitozán-por alkalmazásával. Az eredmények azt mutatták, hogy az NR-kompozit szakítószilárdsága kitozán hozzáadásával csökkent. A kitozán szabálytalan alakja csökkenti a kompozitok mechanikai

szilárdságát, mivel a kitozán képtelen átvenni az NR-mátrixból érkező feszültséget. Általánosságban elmondható, hogy a perzselési idő, a kikeményedési idő és a szakadási nyúlás a NR kitozánterhelésének növekedésével csökken. Megfigyelhető azonban a kitozánnal töltött NR maximális nyomatéka és húzómodulja.

NANO-CELLULÓZ

A cellulóz egy homopoliszacharid, mely 1,4-anhidro-D-glükopiranoz egységeket tartalmaz. A természetes cellulózforrások közé tartoznak a természetes rostok (kender, len, sárga karórépa, búza, banán, kókuszrost stb.) és a farostok stb. A cellulóz monomer egységeinek három hidroxil-csoportja van.

Ezek a hidroxilcsoportok hidrogénkötést kezdeményezhetnek más molekulákkal és/vagy makromolekulákkal, azaz a cellulózorientált kristályos ligandumokkal, és ez szabályozza a kifejlesztett anyagok fő fizikai tulajdonságait. Az 5–60 nm átmérőjű nano-cellulóz-rostok különféle kémiai kezelésekkkel kivonhatók különféle, természetben előforduló növényi rostokból, mint például hancs, kender, nátronpép, kukoricacsutka, olajpálmafa liszt, sárga karórépa stb. Híg szuszpenzióiból TEM-képeket mutat a gyapot, a cukorrépa-pép és a tunicin (tunikából kivont cellulóz).

Kutatók készítettek NR/bambuszrost-kompozitokat készítettek 180–270 mm átlagos hosszúságú száakkal. A szálterhelés növekedésével a kompozitok szakítószilárdsága és nyírószilárdsága csökkenést mutatott. Növekvő szálterhelés mellett, a bambuszrost szabálytalan alakja –párosulva az NR-mátrix gyenge tapadásával – a szakító- és nyírószilárdság romlásának fő tényezőit jelentette. Emellett kutatásokat végeztek papíriszappal töltött NR-kompozitok előállításával kapcsolatban, különféle (10–40 phr) papíriszap töltőanyagok beépítésével, melyek átlagos töltőmérete 300 nm volt. Végül beszámoltak arról, hogy a kompozitok szakítószilárdsága a töltőanyag-tartalommal együtt csökken, és ez ismét a papíriszap-töltőanyagok szabálytalan alakjának tudható be. Éppen ezért a kutatók más nanorészecskéket is előállítottak annak érdekében, hogy a felmerült rossz tapadásra megoldást keressenek. Így pl. nádzsák répából készített nano-cellulóz-egykristályok hossza 84 és 102 nm, szélessége pedig 4–10 nm között volt.

A vulkanizálatlan, nano-cellulózzal erősített NR-ek szakítószilárdsága a töltőanyag-tartalom 7,5-ről 10 tömeg%-ra történő emelésével 4-ről 17 MPa-ra növekedett. Ez a jelentős szakítószilárdság-növekedés annak a mechanikus perkolációs hálózatnak a kialakulásának tudható be, amely hidrogénkötéssel merev és folyamatos hálózatot képez. A 13-as nyújtottságú rúdszerű egykristályok perkolációs küszöbértéke 7,7 tömeg% B-nek felel meg, feltételezve, hogy a száraz NR 1 g cm³-nél és a kristályos cellulóz 1,5 g cm³-nél sűrűbb. A Bagasse nano-cellulóz a legalacsonyabb nyújtottságot adja összehasonlítva a Capim Dourado és datolyapálma egykristályokkal, így az a alacsonyabb szakítószilárdságot is eredményezhet ezeknek az NR/bagasse-egykristályokat tartalmazó nanokompozitoknak.

A kutatások során további nano-töltőanyagok kifejlesztésével is foglalkoznak, így pl. a szintetizált nanokristályos lemezeket viaszos kukoricakeményítőből állították elő, melyek 6–8 nm vastagságú, 40–60 nm hosszúságú és 15–30 nm szélességűek.

Elemezték az ezekkel a nanokristályokkal megerősített vulkanizálatlan NR tulajdonságait. Ennek a nanokristályos töltésű NR-nek a szakadási nyúlása csökken a nanokristály-tartalom növekedésével 1960-tól (töltetlen) 920%-ig (30 tömeg%-kal töltve meg). A 10, 20 és 30 tömeg% töltőanyagot tartalmazó nanokompozit-filmek tárolási relaxációs modulusa 25°C-on körülbelül 10, 75 és 200-szor nagyobb, mint a kitöltetlen NR-mátrixé.

Keményítő-nanokristályok

A keményítő – a cellulóz után – a második leggyakoribb biomassza-anyag a természetben a cellulóz után. Fő forrása a növényi gyökér, a szár, a termésmag és a vágott növények (pl. rizs, kukorica, búza, tápióka, burgonya stb.). A keményítő fő komponensei az amilóz (72–82%) és az amilopektin (18–28%). Az amilózt az (1–4) -a-D-glikozidos kötésekkel összekapcsolt glükózegységek lineáris molekulájaként definiáljuk, amelyek (1–6) -R-kötésekkel kissé elágaznak. Az amilopektin egy erősen elágazó láncú polimer, amely (1–4) -a-D-glükopiranoz viszonylag rövid elágazásaiból áll, amelyet (1–6) -a-D-glikozidos kötések kötnek össze körülbelül 22 glükózegységenként. A keményítő lisztszerű fehér porként fordul elő, mely a növényekből történő kivonása után, hideg vízben oldhatatlan. A natív keményítők 15–45% kristályos anyagot tartalmaznak. A keményítő kristályos, a keményítő nanokristályos, a mikrokristályos keményítő és a hidrolizált keményítő mind a keményítő kristályos részére vonatkozik, melyet savas hidrolízis különböző mértékű előállításával nyernek. A szakirodalomban közölt publikációkban töltőanyagként főleg a keményítő-nanokristályokra összpontosítanak. A cellulóz-nanokristályok 100%-ban kristályos anyagok, a keményítő-nanokristályok 45%-ban kristályos részekből állnak. A viaszos kukoricakeményítő esetében a megadott tömegű keményítőszemcséket ismert koncentrációjú H_2SO_4 -oldattal keverjük össze.

A szuszpenziót kiválasztott sebességgel keverik, azaz orbitális rázást alkalmaznak. Különböző időtartamú hidrolízis után a szuszpenziót egymást követő centrifugálással, desztillált vízben, semlegességig mossák.

A szakirodalom említ szintetizált nanokristályokat, melyek lemezkealakúak és viaszos kukoricakeményítőből állították elő. Méretek: 6–8 nm vastagság, 40–60 nm hosszúság és 15–30 nm szélesség. Ennek a keményítő-nanokristálynak – mely aggregátumok formájában van – átlagos mérete 4,4 nm. Erősítő hatását vizsgálták a vulkanizálatlan NR-mátrixban.

A filmeket/vékony rétegeket 0% relatív páratartalom mellett kondicionálták. Ennek a nanokristályokkal töltött NR-kompozitnak a szakadási nyúlása csökkent a nanokristály-tartalom növekedésével 1960-tól

(töltetlen) 920%-ig (30 tömeg% töltöttség mellett). A szilárdsági modul a keményítőtartalom növelésével szinte exponenciálisan növekedett, a kitöltetlen NR-mátrix 0,64 MPa-jától a 30 tömeg% keményítő-nanokristályt tartalmazó kompozit filmeknél 77,8 MPa-ig. A 10, 20 és 30 tömeg% töltőanyagot tartalmazó nanokompozit-filmek tárolási relaxációs modulusa 25°C-on körülbelül 10 (12,3 MPa), 75 (96 MPa), és 200-szor (257 MPa) magasabb, mint a kitöltetlen NR-mátrixé (1,28 MPa). A húzó modulus csökkent a nagyobb töltőanyag-tartalom esetén (pl. 20 tömeg%), ha az anyagokat 43% relatív páratartalomnak tették ki, szemben az azonos töltési terheléssel, ahol 0% relatív páratartalom volt. A szakadási nyúlás 1500%-ra csökken 5–20 tömeg% töltőanyag-terhelésnél, 43% relatív páratartalom mellett. Magas nedvességtartalom vagy RH mellett a keményítő-nanokristályos töltésű NR tulajdonságainak fenti romlásáért a keményítő-nanokristályok hidrofil jellege felelős. Amikor az anyagokat mechanikai vizsgálatoknak vetik alá, a vízben gazdag töltőanyag/NR-mátrix-interfázis kialakulása az anyagok magas páratartalom mellett történő tárolása esetén akadályozhatja a feszültségátadást a határfelületen.

Galéria

Duma Bálint fotói









